

# **Konzept zur nachhaltigen Emissionsminderung bei Wohngebäuden im Bestand unter Einbeziehung von CO<sub>2</sub>-Zertifikaten**

Vom Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie der  
Technischen Universität Darmstadt zur Erlangung der Würde  
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Dissertation

von  
**Dipl.-Ing. Lamia Messari-Becker**  
**(geb. Messari)**  
aus Larache / Marokko

Referent:	Prof. Dr.-Ing. Peter Grübl
Korreferent:	Prof. Dr. rer. pol. Carsten Helm
Tag der Einreichung:	03. Juli 2006
Tag der mündlichen Prüfung:	22. September 2006

Darmstadt 2006  
D17

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Massivbau, Baustoffe, Bauphysik und Bauchemie der Technischen Universität Darmstadt entstanden.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Grübl bedanke ich mich für die interessante Themenstellung, das entgegengebrachte Vertrauen und die kritischen Anmerkungen herzlich.

Herrn Prof. Dr. Carsten Helm danke ich ganz besonders für die Übernahme des Korreferats, die zahlreichen Anregungen und seine stete Offenheit herzlich.

Herrn Dr. rer. pol. Frithjof Staiss möchte ich für die fachlichen Diskussionen herzlich danken.

Frau Prof. Dr. ret. nat. Liselotte Schebek danke ich für die Anregungen und die kritischen Anmerkungen zu den Öko-Bilanzierungen herzlich.

Danken möchte ich den Studierenden, die im Rahmen von Studienarbeiten zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Stellvertretend gilt mein Dank Carmen Bader, Thomas Krause, Gunther Martin, Orpheus Peter und Christian Sauer.

Frau Ingrid Blessing und Frau Ellen von Borzyskowski danke ich für ihr Interesse am Fortgang dieser Arbeit.

Meinen Eltern und Geschwistern in Marokko danke ich sehr für ihren Zuspruch, der mich während meines Aufenthalts im Ausland begleitet hat. Edith und Rüdiger Harrer danke ich für die tiefe Freundschaft und die stete Unterstützung.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinem Mann Dr. rer. nat. Ulrich Becker für seine unermüdliche Unterstützung, seine Geduld und für die Ermunterung. Diese Arbeit, die zu großen Teilen während meiner zweiten Schwangerschaft entstanden ist, wäre ohne seine Unterstützung nie möglich gewesen.

Meine Tochter Sarah Penelope machte diese Zeit für immer unvergesslich. Sie machte in dieser Phase ihre ersten Schritte und sprach ihre ersten Worte. Ihr ansteckendes Lachen konnte mich auch bei angespannter Stimmung immer wieder erheitern.

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>AUSGANGSSITUATION.....</b>	<b>7</b>
1.1	Allgemeines.....	7
1.2	Herausforderungen des Klimaschutzes.....	7
1.3	Energieeinsparung und CO <sub>2</sub> -Minderung in der Bundesrepublik Deutschland.....	8
1.4	Bedeutung des Altbaubestandes für die CO <sub>2</sub> -Minderungsziele.....	9
1.5	Beiträge der KfW und EnEV zur CO <sub>2</sub> -Minderung im Gebäudesektor.....	11
1.6	Contracting als Finanzierungsmodell von Einsparmaßnahmen .....	13
1.7	Bedeutung einer ganzheitlichen und nachhaltigen Betrachtung.....	14
1.8	Notwendigkeit neuer Ansätze.....	15
<b>2</b>	<b>ZIEL UND AUFBAU DER ARBEIT.....</b>	<b>18</b>
2.1	Zielsetzung der Arbeit.....	18
2.2	Aufbau der Arbeit.....	18
<b>3</b>	<b>GRUNDLAGEN.....</b>	<b>20</b>
3.1	Bauphysikalische Grundlagen.....	20
3.1.1	Wärme.....	20
3.1.2	Heizwärmebedarf.....	21
3.1.3	Heizenergiebedarf.....	21
3.1.4	Primärenergiebedarf.....	22
3.1.5	A/Ve-Verhältnis.....	22
3.2	Einige Regelungen der Energieeinsparverordnung (EnEV).....	22
3.2.1	Anforderungen der EnEV an zu errichtende Gebäude.....	22
3.2.2	Anforderungen der EnEV an bestehende Gebäude und Anlagen.....	23
3.2.3	Energieausweis.....	24
3.3	Betriebswirtschaftliche Grundlagen - Investitionsrechnung.....	24
3.3.1	Statische Verfahren.....	24
3.3.2	Dynamische Verfahren.....	25
3.4	Umweltökonomische Grundlagen.....	26
3.4.1	Externe Effekte.....	26
3.4.2	Quantifizierung externer Kosten.....	26
3.4.3	Das Coase-Theorem.....	27
<b>4</b>	<b>ERMITTLUNG DER MATERIAL- UND BETRIEBSBEDINGTEN CO<sub>2</sub>-EMISSIONEN BEI SANIERUNGSMASSNAHMEN.....</b>	<b>28</b>
4.1	Allgemeines.....	28
4.2	Methodik.....	29
4.2.1	Öko-Bilanzen.....	29
4.2.2	Das Programm GEMIS.....	29
4.3	Systemgrenzen / Abschneidekriterien.....	30
4.4	Materialbedingte CO <sub>2</sub> -Emissionen bei Bauteilsanierungen.....	33
4.4.1	Untersuchungsrahmen und Vorgehensweise.....	33
4.4.2	Wandsanierungen.....	36

4.4.3	Decken- und Bodensanierungen.....	37
4.4.4	Dachsanierungen.....	38
4.4.5	Fenstermodernisierung.....	38
4.4.6	Fazit.....	39
4.5	Material- und betriebsbedingte CO <sub>2</sub> -Emissionen bei apparativen Maßnahmen.....	40
4.5.1	Untersuchungsrahmen und Vorgehensweise .....	40
4.5.2	Heizungsverteilungssysteme.....	40
4.5.3	Anlagen zur Wärmebereitstellung.....	41
4.5.4	Anlagen zur Stromerzeugung.....	42
4.5.5	Bereitstellung von Energieträgern.....	43
4.5.6	Fazit.....	44
<b>5</b>	<b>CO<sub>2</sub>-VERMEIDUNGSKOSTEN VON SANIERUNGSMASSNAHMEN .....</b>	<b>46</b>
5.1	Allgemeines.....	46
5.2	Ökologische und ökonomische Bewertung einer Maßnahme.....	46
5.3	Ermittlung der CO <sub>2</sub> -Vermeidungskosten.....	47
5.3.1	Begriff der CO <sub>2</sub> -Vermeidungskosten .....	47
5.3.2	Mathematischer Ansatz.....	48
5.3.3	Interpretation der CO <sub>2</sub> -Vermeidungskosten .....	49
5.3.4	Berücksichtigung der Vorketten.....	50
5.4	CO <sub>2</sub> -Vermeidungskosten baulicher Sanierungsmaßnahmen.....	51
5.4.1	Vergleich der einzelnen Maßnahmen .....	51
5.4.2	Einfluß der bestehenden Anlagentechnik.....	52
5.4.3	Einfluß der Vorketten der jeweiligen Maßnahme.....	53
5.4.4	Einfluß der Dämmstärke.....	55
5.4.5	Übersicht.....	55
5.5	CO <sub>2</sub> -Vermeidungskosten apparativer Sanierungsmaßnahmen.....	57
5.5.1	Umstieg auf eine effizientere Anlagentechnik .....	57
5.5.2	Übersicht.....	58
5.5.3	Umstieg auf regenerative Energieversorgung und BHKW-Anlagen.....	58
5.5.4	Übersicht.....	60
5.6	Zusammenfassung und Fazit.....	60
<b>6</b>	<b>KONZEPT EINES EMISSIONSHANDELS FÜR WOHNGEBÄUDE IM BESTAND.....</b>	<b>62</b>
6.1	Inhalt des Kapitels.....	62
6.2	Der CO <sub>2</sub> -Emissionshandel als Steuerungsinstrument.....	62
6.3	Rechtliche Rahmenbedingungen eines CO <sub>2</sub> -Emissionshandels für Wohngebäude.....	63
6.3.1	Europarichtlinien und Treibhaus-Emissionshandelsgesetz.....	63
6.3.2	Bestandsschutz.....	64
6.3.3	Bestandsschutz und Energieeinsparungsgesetz im Konflikt.....	64
6.3.4	Energieeinsparverordnung.....	64
6.3.5	Problematik der Eigentümer und Nutzer .....	65
6.4	Wohngebäude im Bestand – Eine Auswahl.....	65
6.5	Betrachtung und Behandlung von Vorketten .....	68
6.6	Technische Rahmenbedingungen eines CO <sub>2</sub> -Emissionshandels.....	70

---

6.6.1	Technisches Minderungspotential für gegebene Gebäudetypen und Beheizungsart.....	70
6.6.2	Sanierungsanteil im Bestand .....	71
6.6.3	Beheizungsstruktur im Bestand .....	72
6.6.4	Gebäudeanzahl nach Gebäudetyp und Beheizungsart.....	72
6.6.5	Abschätzung des gesamten technischen Minderungspotentials.....	73
6.6.6	Fazit.....	74
6.7	Wirtschaftlichkeitsanalyse eines CO2-Emissionshandels.....	76
6.7.1	Ansatz und Annahmen.....	76
6.7.2	Wirtschaftlichkeitsanalyse baulicher Maßnahmen .....	80
6.7.3	Wirtschaftlichkeitsanalyse bei baulichen und anschließenden apparativen Maßnahmen - Ein Beispiel.....	82
6.7.4	Sensitivitätsanalyse.....	84
6.7.5	Wirtschaftliches CO2-Minderungspotential.....	87
6.7.6	Fazit.....	89
6.8	Abwicklung des CO2-Emissionshandels .....	89
6.8.1	Energieausweis als Überwachungsinstrument.....	89
6.8.2	Zuteilung von Zertifikaten.....	90
6.8.3	Ablauf des Handels.....	92
6.9	Fazit.....	92
<b>7</b>	<b>KONSEQUENZEN FÜR DIE UMSETZUNG.....</b>	<b>94</b>
<b>8</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....</b>	<b>96</b>
	<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>100</b>
	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....</b>	<b>106</b>
	<b>TABELLENVERZEICHNIS.....</b>	<b>108</b>
	<b>ANHANG.....</b>	<b>109</b>

## Abkürzungsverzeichnis

ALU	Aluminium
AW	Außenwand
AW1-AW4	Außenwandsanierung nach Tabelle 4.6
BHKW	Blockheizkraftwerk
BLP	expandierte Perlite
BW	Brennwert
DA1-DA6	Dachsanierung nach Tabelle 4.6
DE1-DE3	Deckensanierung nach Tabelle 4.6
DEHST	Deutsche Emisisonshandelstelle
EFH	Einfamilienhaus
EnEV	Energieeinsparverordnung
EP	Energiepreis
EPS	Polystyrol-Hartschaum
FN	Fenster auf der Nordseite
FS	Fenster auf der Südseite
FW/O	Fenster auf der West/Ost-Seite
GEMIS	Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme
GMH	Großmehrfamilienhaus
GLW	Glaswolle
HAN	Hanf
HLZ	Hochlochziegel
HOL	Holz
HWL	Holzwohleplatten
Hzg	Heizungsanlage
ISG	Isoverglasung
KD	Kellerdecke
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KW1	Kellerwandsanierung nach Tabelle 4.6
MFH	Mehrfamilienhaus

---

MVA	Müllverbrennungsanlage
NAP	Nationaler Allokationsplan
NKP	Nationales Klimaschutzprogramm
NT	Niedertemperatur
OG	Obergeschoßdecke
PUR	Polyurethan-Hartschaum
PVA	Photovoltaikanlage
PVC	Kunststoff
RH	Reihenhaus
TMP	technisches CO <sub>2</sub> -Minderungspotential
SGL	Schaumglas
SRP	Schilfrohrplatten
STW	Steinwolle
THEG	Treibhaus-Emissionshandels-Gesetz
U	Wärmedurchgangskoeffizient [W/(m <sup>2</sup> K)]
VZ	Vollziegel
WDP	Wärmedämmputz
WDVS	Wärmedämmverbundsystem
WEA	Windenergieanlage
WLG	Wärmeleitgruppe
WMP	wirtschaftliches CO <sub>2</sub> -Minderungspotential
WSG	Wärmeschutzverglasung
WSchV	Wärmeschutzverordnung
WSchV77	Wärmeschutzverordnung, 1977 in Kraft getreten
ZEL	Zellulose
ZS	Zinssatz

**Indizes**

<i>alt</i>	alter, unsanierter Zustand
<i>e</i>	erneuerbar
<i>eff</i>	effektiv
<i>E</i>	Energieeinsparung
<i>ne</i>	nicht erneuerbar

<i>neu</i>	neuer, sanierter Zustand
<i>RW</i>	Raumwärme
<i>Z</i>	Zertifikatsverkauf

**Symbole**

$A/V_e$	Verhältnis der Nutzfläche zum beheizten Volumen in $\text{m}^{-1}$
$e_E$	Anteil eines Energieträgers an der gesamten Beheizungsstruktur in %
$E_E$	jährliche Erlöse aus Energieeinsparung in €/a
$E_Z$	jährliche Erlöse aus Zertifikatshandel in €/a
$\text{CO}_2$	Kohlendioxid
$\text{CO}_{2,E}$	unmittelbare Emissionseinsparung durch Sanierungsmaßnahmen in $\text{kgCO}_2$
$\text{CO}_{2,V}$	Vorketten der Sanierungsmaßnahmen in $\text{kgCO}_2$
$d$	Dicke eines Bauteils oder Baustoffes in cm oder m
$f_{z,t}$	dimensionsloser Faktor zur Berücksichtigung der zeitlich gedehnten Finanzierung bei der Ermittlung der $\text{CO}_2$ -Vermeidungskosten
$g$	Energiedurchlaßgrad eines Fensters
$N_G$	Gebäudeanzahl
$I$	Investitionskosten in € oder €/a
$n$	Zeitraum (z.B. Lebensdauer, Kreditlaufzeit oder Bilanzzeitraum) in Jahren
$U$	Wärmedurchgangskoeffizient in $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
$\Delta Q$	Jährliche Heizwärmeeinsparung in $\text{kWh/a}$
$Q$	Jährlicher Heizwärmebedarf in $\text{kWh/a}$
$r$	Zinssatz in %/100
$t$	Laufzeit in Jahren
$\kappa$	Konversionsfaktor eines Heizsystems in $\text{kgCO}_2/\text{kWh}$
$\varphi$	Verlustfaktor eines Heizsystems
$Z$	jährliche Annuität in €/a



# 1 Ausgangssituation

## 1.1 Allgemeines

Es ist inzwischen allgemein anerkannt, daß die nachhaltige Minderung der Emission klimaschädlicher Gase eine ökologische Notwendigkeit ist. Die Bundesrepublik Deutschland ist deshalb diesbezüglich internationale Verpflichtungen eingegangen. Um diese einhalten zu können, sind solche Emissionsminderungen auch in privaten Haushalten unvermeidlich.

Bisherige Maßnahmen in diese Richtung erzielen aber nicht die notwendige Wirkung im Altbaubestand. In dieser Arbeit soll dazu ein neuer Ansatz auf seine Wirksamkeit und Machbarkeit hin untersucht werden. Die ökologische Effektivität und die ökonomische Effizienz von emissionsmindernden Sanierungsmaßnahmen werden dabei unter ganzheitlichen Gesichtspunkten bewertet, um dem Anspruch einer nachhaltigen Emissionsminderung gerecht zu werden.

In der weiteren Arbeit wird unter *Emissionsminderung* die Minderung der Emissionen klimaschädlicher Gase verstanden. Wie üblich werden diese in CO<sub>2</sub>-Äquivalente umgerechnet. Im folgenden werden wir deshalb, sprachlich griffiger, von CO<sub>2</sub>-Minderung sprechen.

Unter dem Begriff der *Vorketten* wird die Umweltbelastung durch klimaschädliche Emissionen verstanden, die bei den Herstellungsprozessen der Produkte sowie den vorgelagerten Prozessen zur Gewinnung der Edukte (Ausgangstoffe) entstehen.

Desweiteren wird unter *CO<sub>2</sub>-Einsparung* die Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen verstanden, die unmittelbar am bzw. im Gebäude durch Sanierungsmaßnahmen erzielt werden. Werden die Vorketten von dieser CO<sub>2</sub>-Einsparung abgezogen, ergibt sich die (effektive) Reduzierung, im weiteren *CO<sub>2</sub>-Minderung* genannt.

## 1.2 Herausforderungen des Klimaschutzes

In ihrem dritten Assessment-Report im Jahr 2001 warnte der zwischenstaatliche Ausschuß „Intergovernmental Panel on Climate Change“ (IPCC) anhand konkreter Forschungsergebnisse vor weltweiten Klimaänderungen mit katastrophalem Ausmaß. Hauptsächlich sei das auf die Verbrennung von fossilen Energieträgern und die damit verbundene Emission der Treibhausgase, insbesondere CO<sub>2</sub>, zurückzuführen [IPCC2001].

Um das Weltklima zu stabilisieren, wird in 2050 eine Halbierung der Emission von Treibhausgasen gegenüber dem Niveau von 1990 (20 Mrd. tCO<sub>2</sub>) als notwendig angesehen. Berücksichtigt man die Entwicklung einiger ärmerer Länder, ist sogar eine Reduzierung von 80% bei den Industrienationen notwendig [Enquête2002]. Für das Jahr 2050 wird eine Weltbevölkerung von 10 Mrd. Menschen erwartet. Pro Person und Jahr entspricht dies einem Zielwert von 1 Tonne CO<sub>2</sub>. Für Deutschland bedeutet eine Reduzierungsrate von 80% im Vergleich zu 1990 (1 Mrd. Tonne CO<sub>2</sub>) einen Zielwert der Gesamtemissionen von 200 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>. Setzt man eine Bevölkerung von 80 Mio. Menschen an, so ergeben sich immer noch 2,5 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Person, das 2,5-fache vom stabilisierenden Zielwert. Mit anderen Worten, selbst eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 80% ist nur als vorläufiges Ziel zu rechtfertigen.

Für das Jahr 2100 geht das IPCC von einer globalen Erwärmung von +3 bis +4 Grad aus [Schönwiese2006]. Bereits bei der derzeitigen Erwärmung von +0,8 Grad sind ernst zu nehmende Entwicklungen zu beobachten, wie z.B. mehr Überschwemmungen, mehr Dürren, stärkere Hurrikane, Schneefall in der algerischen Wüste etc.. Folgeerscheinungen der Klimaänderung an

sich (sog. Rückkoppelung wie der Einfluß der Erderwärmung auf die CO<sub>2</sub>-Konzentration) sind bisher in den Untersuchungen nicht ausreichend berücksichtigt worden. Diese können den Prozeß des Klimawandels an sich verstärken und die prognostizierte globale Erwärmung um 15 bis 78% erhöhen [PIK2006]. So werden bereits in den arktischen Regionen bisher im Dauerfrostboden gebundenes CO<sub>2</sub> und Methan zunehmend freigesetzt und belastet zusätzlich die Bilanz. Ein Abschwächen des Golfstroms, der für das wärmere Klima Nordeuropas im Vergleich zu Russland oder Kanada verantwortlich ist, könnte im Bezug auf den Energieverbrauch beachtliche Folgen haben.

Diese Zahlen und Entwicklungen verdeutlichen das Ausmaß der Anstrengungen, die auf internationaler und nationaler Ebene unternommen werden müssen, um die dringend notwendige Klimastabilisierung herbeizuführen.

### **1.3 Energieeinsparung und CO<sub>2</sub>-Minderung in der Bundesrepublik Deutschland**

Als Folge der Ölkrise von 1973 hat die Bundesregierung das Energieeinspargesetz [EnEG1976] in 1976 erlassen. Diesem folgten weitere Verordnungen mit dem Ziel, Energie einzusparen. Für den Gebäudesektor wurden die Wärmeschutzverordnung (WSchV) 1977 und Heizungsanlagenverordnung (HeizAnlV) 1978 erlassen und später novelliert. Sie stellten Anforderungen an den Neubau, Umbau [WSchV1977] und Betrieb von Gebäuden [HeizAnlV1978].

Auf internationaler Ebene wurde 1997 das Kyoto-Protokoll als Zusatzprotokoll zur Ausgestaltung der Klima-Rahmenkonvention der Vereinten Nationen für den Klimaschutz (UNFCCC) verabschiedet. Das Kyoto-Protokoll trat am 16. Februar 2005 in Kraft, nach dem mindestens 55 Staaten das Abkommen ratifiziert haben, die zusammen mehr als 55% der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Jahres 1990 verursachten. Bei der Lastenverteilung entfielen 8% Reduktion auf die Europäische Union. Bei der Klima-Konferenz von Marakkesch wurde dieser Betrag auf 5% reduziert. Deutschland übernimmt davon 75%.

Mit dem Nationalen Klimaschutzprogramm der Bundesrepublik Deutschland (NKP) von 2005 sollen die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Zeitraum 2008 bis 2012 um 21% reduziert werden [NKP2005]. Bis 2003 konnte Deutschland seine Emissionen bereits um 18,5% reduzieren, während andere Industrienationen um bis zu 42% (Spanien) mehr Emissionen verursacht haben.

Das NKP legt Zielwerte der Emissionen für die Sektoren Energie und Industrie, Haushalte und Verkehr sowie Gewerbe, Handel und Dienstleistungen fest. Für den privaten Haushaltssektor liegen sie bei ca. 120 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr und entsprechen einer 7%igen Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber 1990. U.a. umfaßt der Maßnahmenkatalog Fördermaßnahmen für die Reduzierung des Energiebedarfs für die Raumkonditionierung und für den Einsatz nachwachsender Rohstoffe sowie ordnungsrechtliche Maßnahmen wie z.B. den Energieausweis.

Die Bundesregierung hat für den Gebäudesektor mehrere finanzielle Förderprogramme aufgelegt. Für die privaten Haushalte und als Element des NKP ist das „CO<sub>2</sub>-Gebäudesanierungsprogramm“ zu nennen. Dieses wurde 2001 ins Leben gerufen und fördert umfangreiche Maßnahmenpakete zur CO<sub>2</sub>-Einsparung, wenn mit diesen Maßnahmen mindestens 40 kgCO<sub>2</sub> pro m<sup>2</sup> Nutzfläche und Jahr eingespart werden [KfW2006]. Das Programm „Wohnraum Modernisieren“ stellt eine Alternative dar, da hier auch Einzelmaßnahmen gefördert werden.

Als wesentliches Element des Nationalen Klimaschutzprogramms für den Gebäudesektor trat die Energieeinsparverordnung (EnEV) 2002 in Kraft und wurde mehrmals novelliert. Sie faßte die Wärmeschutz- und Heizungsanlagenverordnung zusammen und stellte erstmalig Anforderung an

den Primärenergiebedarf, um den Energiebedarf für die Beheizung von Gebäuden und die Warmwasserbereitung nachhaltig zu begrenzen. Die EnEV stellt Anforderungen an die zu errichtenden Gebäude sowie an bestehende Gebäude und Anlagen und macht die Ausstellung eines Ausweises über Energie- und Wärmebedarf für die zu errichtenden Gebäude zur Pflicht. Im noch nicht veröffentlichten Referentenentwurf der neuen EnEV-Novelle, die noch in 2006 in Kraft treten soll, wird der Energieausweis auch für bestehende Gebäude zur Pflicht.

Mit dem Erlass des Erneuerbare Energien Einspeisungsgesetzes (EEG) schaffte die Bundesregierung eine weitere Möglichkeit, die Verbrennung fossiler Energieträger einzugrenzen und emissionsarm zu wirtschaften. Im [EEG2004] werden Energieversorger verpflichtet, regenerativ hergestellte Energie abzunehmen und zu bestimmten Sätzen zu vergüten. Laut [BMU2006] wurden im Jahr 2005 durch die Nutzung erneuerbarer Energien insgesamt 84. Mio tCO<sub>2</sub> vermieden, davon rund 18,4 Mio Tonnen im Wärmebereich.

#### 1.4 Bedeutung des Altbaubestandes für die CO<sub>2</sub>-Minderungsziele

Trotz der Schaffung gesetzlicher Rahmenbedingungen, um Energie zu sparen und die klimaschädlichen Emissionen zu reduzieren, fiel 1999 etwa ein Drittel und damit der größte Anteil des gesamten Energieverbrauchs in Deutschland in den Haushalten an [BMU2002] (s. Abbildung 1.1).

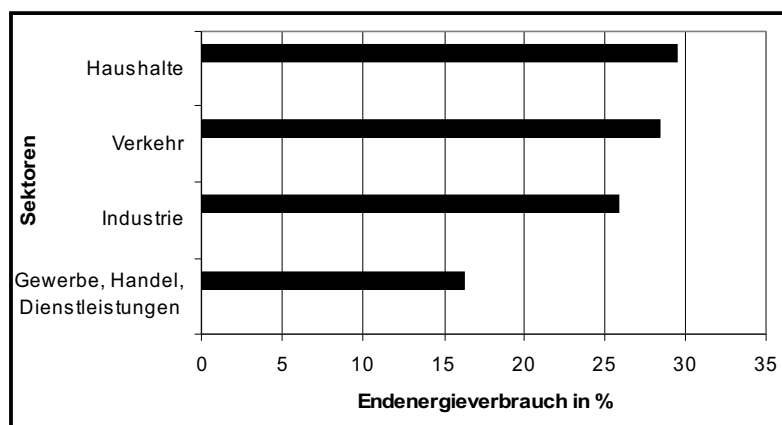


Abbildung 1.1: Endenergieverbrauch in % nach Sektor, eigene Darstellung nach [BMU2002]

Bei Gebäuden, die vor 1978 errichtet wurden und die damit im Sinne der hier verwendeten Definition nach [Gertis1999] dem Altbau entsprechen, liegt ein großes Einsparpotential vor aufgrund der zum Zeitpunkt der Errichtung fehlenden Verordnungen zu Wärmeschutz und Energieeinsparung. Ungefähr 79% der Gebäude in den alten bzw. 74% in den neuen Bundesländern wurden vor 1978 errichtet, wie Abbildung 1.2 zeigt [SBA2003A].

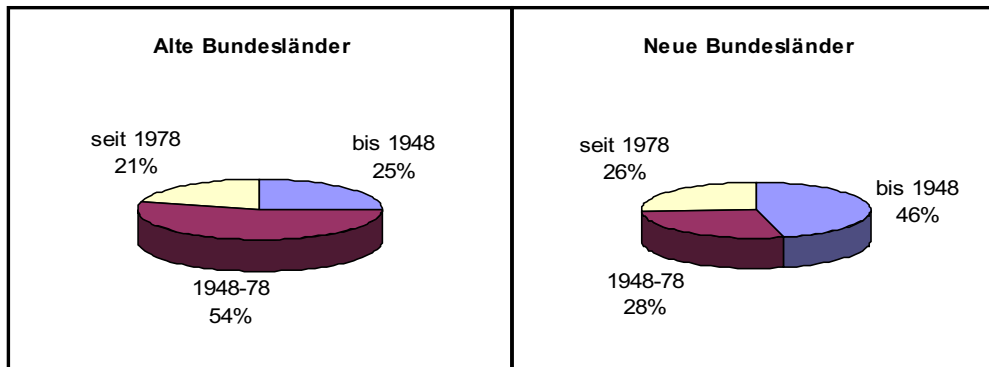


Abbildung 1.2: Baujahrverteilung in Deutschland (1998) nach [SBA2003A]

Der größte Anteil des Endenergieverbrauchs in den Haushalten wird für Heizung und Warmwasser verwendet.

Im Jahr 2004 verursachten private Haushalte ca. 13% der insgesamt angefallenen CO<sub>2</sub>-Emissionen [NAP2006]. Ca. 90% davon entstehen im Bereich des Altbaubestandes [Gertis1997]. Das technische Einsparpotential des Energieverbrauchs bestehender Gebäude wurde in Studien auf 70-90% geschätzt [EbEiFei1992]/[Walz1997]. Diese Zahl reduziert sich allerdings auf 50%, wenn man das im Energieeinspargesetz geforderte Wirtschaftlichkeitskriterium hinzuzieht. Die Enquête Kommission des 12. Bundestages „Schutz der Erdatmosphäre“ bestätigte bereits bis 2005 ein Minderungspotential des Energieverbrauchs von 30%, und daß die Realisierung von zwei Drittel allein durch Wärmeschutzmaßnahmen im Altbau möglich wäre [Enquête1995].

Diese Zahlen machen die außerordentliche Bedeutung des Gebäudebestandes in Bezug auf CO<sub>2</sub>-Minderungsziele und ihre Erreichung in Deutschland deutlich. Um dem Anspruch einer nachhaltigen Emissionsminderung gerecht zu werden, kann man einen wichtigen Verursacher nicht auf seinem *status quo* belassen. Deshalb müssen bei der energetischen Sanierung des Altbaubestandes Fortschritte erzielt werden.

Die Bundesregierung definiert im Nationalen Allokationsplan 2006 Zielwerte der Emissionen und den erforderlichen Handlungsbedarf für den Zeitraum 2008-2012. Für Haushalte beträgt der Zielwert 120 Mio tCO<sub>2</sub>/Jahr. Im Zeitraum 2000 bis 2002 betrug die durchschnittliche Veränderung 5,2%, bezogen auf das Jahr 1990.

Die Maßnahmen zur Erreichung des Minderungszieles von 120 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr im Zeitraum 2008 bis 2012 umfassen Fördermaßnahmen, ordnungsrechtliche Maßnahmen, Öffentlichkeitsarbeit und autonome Minderungseffekte. Weitere Maßnahmen sind nicht vorgesehen.

## 1.5 Beiträge der KfW und EnEV zur CO<sub>2</sub>-Minderung im Gebäudesektor

Es ist unumstritten, daß die EnEV einen Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung im Gebäudesektor liefern kann. Die Langlebigkeit und die lange Nutzungsdauer von Gebäuden (50 bis 100 Jahre) und vor allem die Tatsache, daß eine umfassende Sanierung die energetische Qualität eines Gebäudes für die nächsten 50 Jahre festlegt, erfordern eine an diesen Gegebenheiten angepasste Strategie bei der Formulierung der Anforderungen an den Bestand. In diesem Zusammenhang sind die um rund 40% geringeren Anforderungen an den Bestand im Vergleich zu Neubauten und die vielen anderen Befreiungsmöglichkeiten (s. Abschnitt 3.2.2) nicht zielführend im Hinblick auf eine nachhaltige Entwicklung im Gebäudesektor und die damit verbundenen Energieeinsparungsstrategien und Emissionsminderungsziele [GrüMess2002].

Laut dem Konsultationspapier des Bundestags zur Entwicklung eines Instruments zur Förderung der erneuerbaren Energien im Wärmemarkt vom 24.05.2006 haben die heutigen Förderinstrumente, wie z.B. das Marktanreizprogramm, der Emissionshandel und das Kraftwärmekoppelungsgesetz (KWKG) bislang nicht genügend Anreize gegeben, die Potenziale der erneuerbaren Energien im Wärmebereich ausreichend zu erschließen. In den Jahren von 2003 bis 2005 ist der Anteil der erneuerbaren Energien am Wärmemarkt nur geringfügig von 5,1 auf 5,4% gestiegen und es sind daher weitere Anstrengungen erforderlich [Bund2006]. Im folgenden wird nur auf die für den Gebäudesektor direkt relevanten Instrumente zur Energieeinsparung und Emissionsminderung eingegangen.

Das KfW-Förderprogramm „CO<sub>2</sub>-Gebäudesanierungsprogramm“ und die EnEV stellen zwei zentrale Klimaschutzinstrumente der Bundesregierung für den Gebäudesektor dar. Bei der Erfassung ihrer Beiträge zum Klimaschutz ist eine Abgrenzung schwierig vorzunehmen, da sie parallel in Anspruch genommen bzw. angewandt werden. Die neusten Evaluierungen diesbezüglich wurden vom Institut für Energie- und Umweltforschung in Heidelberg und vom Institut für Wohnen und Umwelt in Darmstadt in Zusammenarbeit durchgeführt. Die folgenden Angaben stützen sich weitgehend auf den Endbericht der Studie [IFEU/IWU2005].

In den Bestand greift die EnEV insbesondere mit Anforderungen an Bauteile und Anlagen ein. Bei Berücksichtigung der Erneuerungszyklen der Gebäude und einer vollständigen Umsetzung der Dämmanforderungen ergibt sich eine theoretische Minderung von 1.049.000 Tonnen pro Jahr im Zeitraum zwischen 2002 und 2012. Berücksichtigt man die vielen Einschränkungen der EnEV, die z.B. bei Eigentumswechsel, Nutzung im Eigenbedarf und ausführungstechnisch bedingten Gegebenheiten greifen, bleibt ein realistisches Minderungspotential von jährlich 454.000 Tonnen, was ca. 43% des maximal möglichen Potentials entspricht (s. Abbildung 1.3). Durch die Berücksichtigung von Vollzugsdefiziten reduziert sich das gesamte theoretisch mögliche Einsparpotential im Zeitraum 2002 bis 2012 auf 32%, d.h. von 11,5 Mio. Tonnen auf bis zu 3,7 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>.

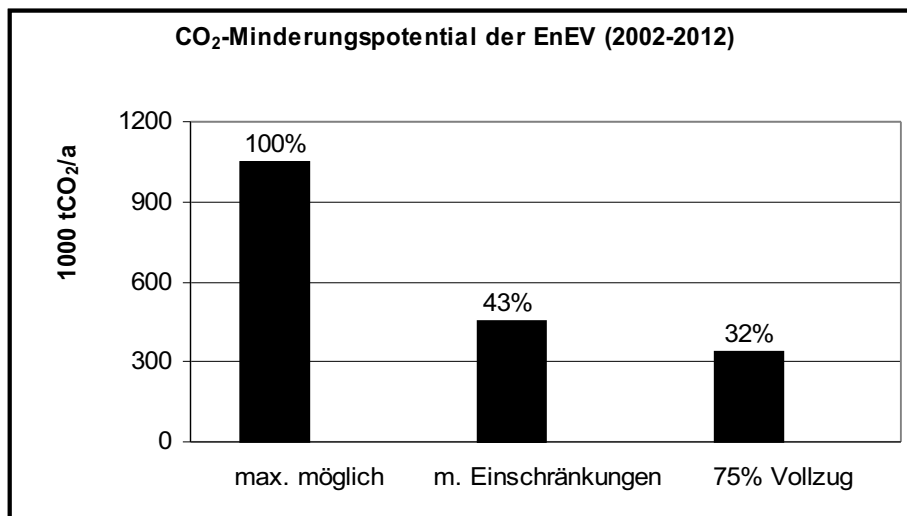


Abbildung 1.3: EnEV-Minderungspotential, eigene Darstellung nach [IFEU/IWU2005]

Bei dem CO<sub>2</sub>-Gebäudesanierungsprogramm der KfW handelt es sich um eine durch den Bund finanzierte Energiesparförderung, die 2001 eingerichtet wurde. Es werden sechs verschiedene Maßnahmenpakete zur energetischen Sanierung bzw. Modernisierung von Wohngebäuden, die vor 1979 errichtet wurden, angeboten. Die Maßnahmenpakete 0 bis 3 und 5 schreiben eine festgelegte Kombination unterschiedlicher Einzelmaßnahmen unter Einhaltung vorgegebener Qualitätsstandards vor (Mindestdämmstärken, vorgegebene U-Werte für Fenster, vorgegebene Maßnahmen bei der Wärmeversorgung etc.), während das Maßnahmenpaket 4 eine Freiheit bei der Maßnahmenauswahl zulässt, dafür die Erreichung einer vorgegebenen CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung fordert. Diese werden unter Berücksichtigung der betrieblichen Emissionen der Energieträger beurteilt.

Durch die mit dem KfW-CO<sub>2</sub>-Gebäudesanierungsprogramm geförderten Maßnahmen wurden im Jahr 2002 etwa 0,1 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> eingespart. Mit einem Kreditvolumen von insgesamt 5 Mrd. € in den Jahren 2001-2005 soll eine CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung von etwa 0,5 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> erreicht werden. Erhöht sich das jährliche Kreditvolumen zukünftig auf 1,8 Mrd. €, könnte eine Minderung von 0,18 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr erzielt werden. Bezogen auf die Gesamtemissionen der Haushalte (Neu- und Altbau) im Jahr 1990 von 129,5 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>, entspricht das einer Minderungsrate von ca. 0,77%. Für den Altbaubereich, der 90% der gebäudebezogenen Emissionen verursacht, beträgt sie ca. 0,86%.

Bei den Angaben wurden nur die direkten CO<sub>2</sub>-Emissionen im Sektor Haushalte berücksichtigt, nicht jedoch die Minderungen z.B. der Stromwirtschaft durch Einsparung elektrischer Energie bei der Gebäudewärmeversorgung. Würde dieser Energieträgeraufwand berücksichtigt werden, ergeben sich etwa doppelt so hohe Werte (z.B. 1,7% im Altbaubereich).

Abbildung 1.4 stellt die CO<sub>2</sub>-Emissionen verschiedener Gebäudestandards für Heizung und Warmwasser bezogen auf 1 m<sup>2</sup> Gebäudenutzfläche und Jahr dar.

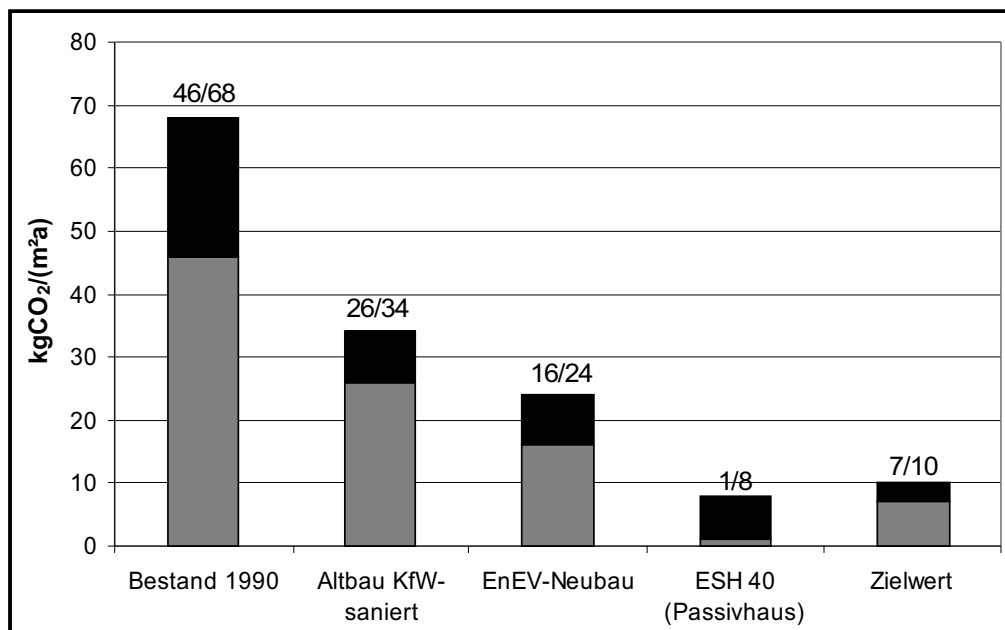


Abbildung 1.4: CO<sub>2</sub>-Emissionen verschiedener Gebäudestandards (Angaben ohne/mit Energieträgeraufwand, Darstellung leicht geändert [IFEU/IWU2005])

Der für die Erreichung der 80%igen Reduzierung<sup>1</sup> nötige Zielstandard liegt bei 7 bzw. 10 kgCO<sub>2</sub>/m²a (ohne bzw. mit Vorketten). Der Passivhaus-Standard kommt dieser Zielgröße sehr nah. Die mit KfW-Förderung sanierten Gebäude überschreiten den Zielstandard etwa 3,5-fach. Unter Berücksichtigung der verbleibenden Zeit von ca. 50 Jahren, der Modernisierungsraten, der Modernisierungs- und Erneuerungszyklen eines Gebäudes erscheint eine Annäherung an das Ziel mit den jetzigen Programmen nicht erreichbar.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß das KfW-CO<sub>2</sub>-Gebäudesanierungsprogramm und die EnEV zwar Beiträge zum Klimaschutz liefern; sie reichen jedoch nicht aus, um die erforderliche Emissionsminderung herbeizuführen. Es bedarf neuer Wege, die einen möglichst geringen ökonomischen Aufwand erfordern.

## 1.6 Contracting als Finanzierungsmodell von Einsparmaßnahmen

Der Begriff Contracting wird häufig als Synonym für eine Drittfinanzierung verwendet. Darunter ist die Auslagerung der Finanzierung von Maßnahmen zur Bereitstellung von Energie oder zur effizienten Verwendung von Energie an einen Dritten zu verstehen. Wesentlicher Vorteil des Contracting ist, daß der Nutzer kein Kapital binden muß und dennoch seine Ziele erreicht. Zudem wird das Investitionsrisiko vom Contractor getragen. Contractingmodelle werden insbesondere im Bereich der öffentlichen Liegenschaften und der Kommunen genutzt.

Dabei wird im wesentlichen zwischen dem klassischen Energieliefer-Contracting und Einspar-Contracting unterschieden. Beim Energieliefer-Contracting übernimmt der Contractor die Aufgaben der Energieversorgung (Wärme oder Strom). Dazu gehören Beratung, Planung, Finanzierung und Ausführung des Projektes. Der Contractor verkauft die Energie an den Gebäudenutzer, finanziert die getätigten Investitionen und erzielt Gewinne. Beim Einspar-Contracting werden vom Contractor energiesparende anlagentechnische Maßnahmen durchgeführt und finanziert, wobei eine bestimmte Energieeinsparung garantiert werden muß. Die Rückfinanzierung erfolgt durch die Beteiligung an den erzielten monetären Einsparungen. Neben den klassischen Contractingvarianten existieren

<sup>1</sup>Vgl. Abschnitt 1.2

mittlerweile weitere vielfältige Varianten, deren Auftrag nicht zuletzt von der Ausgestaltung der jeweiligen Verträge abhängt. Diese betreffen jedoch überwiegend Energieversorgungs- und Energiemanagementsysteme.

Die Erweiterung des Einspar-Contracting auf wärmeschutztechnische Maßnahmen ist dagegen wenig verbreitet. Maßnahmen an der Gebäudehülle werden meist selektiv durchgeführt, da die Finanzierung von umfassenden Sanierungsmaßnahmen allein aus den Energieeinsparungen in der Regel nicht möglich ist. Laut [Dena2006] sind solche Maßnahmen beim Contracting mit erheblich größeren Investitionen verbunden als das klassische Energiespar-Contracting. Eine vollständige Amortisation der Investitionskosten während der Vertragslaufzeit ist kaum erreichbar. Es müssen daher besondere Finanzierungsmodelle angewendet werden. Neben der Grundvergütung des Contractors aus dem garantierten Energieeinsparbetrag muß der Auftraggeber einen zusätzlichen Beitrag im Rahmen eines Ratenzahlungs- oder Baukostenzuschußmodells leisten.

Speziell für den privaten Wohnsektor ist nicht zu erwarten, daß dieser Sachverhalt die bereits bestehenden Hemmnisse und mangelnde Investitionsbereitschaft gegenüber energetischen Sanierungsmaßnahmen beseitigt.

## 1.7 Bedeutung einer ganzheitlichen und nachhaltigen Betrachtung

Der Begriff der Nachhaltigkeit stammt ursprünglich aus der Forstwirtschaft und geht auf den Oberberghauptmann Hans Carl von Carlowitz (1645 bis 1714) zurück. Sein Werk *Sylvicultura oeconomica*, auf Altdeutsch *haußwirthliche Nachricht und Naturmäßige Anweisung zur wilden Baum-Zucht* aus dem Jahre 1713 gilt als erstes geschlossenes Werk über Forstwirtschaft und der Verfasser als Schöpfer der forstlichen Nachhaltigkeit. Diese bedeutet, daß nicht mehr Holz eingeschlagen werden soll als nachwachsen kann [Filippi1998]. Im Jahre 1987 tauchte der Begriff der Nachhaltigkeit im Abschlußbericht der Brundtland-Kommission „Unsere gemeinsame Zukunft“ als *Sustainability* wieder auf. Dort wurde erstmals das „Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung“ definiert, das eine internationale Debatte über Entwicklungs- und Umweltpolitik auslöste. Unter einer nachhaltigen Entwicklung versteht die Kommission eine Entwicklung,

*„die den Bedürfnissen der heutigen Generation entspricht, ohne die Möglichkeiten künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen und ihren Lebensstil zu wählen.“*

Die Knappheit der fossilen Energieträger und die Energiepreiskrise vom Jahr 1973 erzeugten ein gesellschaftliches Interesse, mit Energie sparsam umzugehen und neue energieeffiziente Technologien zu fördern. In den letzten Jahren dreht sich die öffentliche Diskussion eindeutig um Umweltbelastung, Klimaveränderungen und die daraus resultierende notwendige Internalisierung externer Effekte. Nicht der Energieverbrauch alleine, sondern auch und insbesondere der CO<sub>2</sub>-Ausstoß und seine Wirkungen auf die Umwelt werden als Bewertungskriterien angesehen. Innerhalb dieser Diskussion steht deshalb die Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes im Vordergrund.

Dem Bereich Bauen und Wohnen kommt hier aufgrund des hohen Energieaufwands für die Gebäudebeheizung, der baulichen Stoffflüsse und deren unmittelbaren Wirkungen auf das regionale Klima eine besondere Rolle zu. In den letzten Jahren sind zahlreiche Projekte zu Öko-Bilanzierungen von Gebäuden und Gebäudebeständen durchgeführt worden [Kohler2004]. Die detaillierte Analyse der Umweltbelastung durch Bau-, Sanierungs- und Beheizungsmaßnahmen im privaten Gebäudesektor stellt heute kein Problem dar, auch wenn das mit einem gewissen Aufwand verbunden ist.

Die verpflichtende Implementierung der Erkenntnisse in die Praxis als Instrument einer ganzheitlichen Strategie zur Emissionsminderung blieb jedoch aus. So werden selbst bei den



Förderkriterien der KfW-Programme zur Emissionsminderung keine Emissionen berücksichtigt, die z.B. bei der Herstellung der im Rahmen einer Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahme eingesetzten Stoffe anfallen. Was die Energieträger angeht, mag diese Vorgehensweise vertretbar sein, da die Umweltbelastung durch Gewinnung, Transport und Umwandlung auf anderen Ebenen der Klimaschutzprogramme (z.B. Emissionshandel) angerechnet werden. Allerdings ist festzuhalten, daß für die Erreichung der Minderungsziele eine ganzheitliche Betrachtung sinnvoll ist, zumal die Verteilung der Minderungsziele durch eine Nichtberücksichtigung sich *nur* verschiebt, womöglich hinein in Sektoren mit höheren CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten, was ökonomisch nicht zu vertreten wäre.

Was die Umweltbelastung durch den Einsatz von Baustoffen, Bauprodukten und Energiebereitstellungs- bzw. Verteilungsanlagen im Rahmen einer Sanierungsmaßnahme angeht, stellen sich einige Fragen. Erstens, wie können sie berücksichtigt werden? Zweitens, wem können oder müssen ihre Kosten zugemutet werden (Industrie oder Nutzer)? Drittens, gibt es Wege, die die Berücksichtigung zulassen, ohne große Einschnitte in der Freiheit des Gestalters *und* bei den Klimaschutzziele für den Gebäudebereich in Kauf nehmen zu müssen?

In dieser Arbeit werden Ansätze bzw. Antworten auf diese Fragen geliefert. Die erste eher technische Frage betrifft die Methodik zur Ermittlung und Einbindung in die Bewertungskriterien. Die zweite Frage kann nur umweltpolitisch und gesetzlich beantwortet werden. Die dritte Frage verlangt nach einem Instrument, das dem „Verursacher“ Anreize bietet, möglichst energieeffiziente und emissionsarme Stoffe und Produkte einzusetzen und in diesem Falle dafür auch belohnt zu werden. Auch dafür liefert diese Arbeit einen Ansatz.

## 1.8 Notwendigkeit neuer Ansätze

Dem Ansatz, mit gesetzlichen Vorschriften ökologische Standards im Altbaubestand durchzusetzen, steht u.a. der Bestandsschutz entgegen.

Das Grundgesetz der Bundesrepublik Deutschland schützt im Artikel 14 Abs. 1 das Eigentum und das Erbrecht. Es heißt „Das Eigentum und das Erbrecht werden gewährleistet. Inhalt und Schranken werden durch die Gesetze bestimmt.“[GG1976]. Mit diesem Umstand wird der Begriff Bestandsschutz verbunden. Zu unterscheiden sind der aktive und passive Bestandsschutz. Der passive Bestandsschutz ist hier von Interesse, denn er bedeutet den Schutz einer zum Zeitpunkt der Errichtung bestehenden Rechtsposition gegenüber späteren Rechtsverordnungen.

Auf der Grundlage des Energieeinsparungsgesetzes (EnEG) können Verordnungen über Energieeinsparung erlassen werden. Die Bundesregierung kann nach §4 Abs. 3 der Energieeinsparverordnung Rechtsverordnungen erlassen, die Anforderungen auch an den Bestand stellen, so daß an „bestehende Gebäude, Anlagen oder Einrichtungen einzelne Anforderungen nach den §1, 2 Abs. 1 und 2 und §4 Abs. 1 gestellt werden können, wenn die Maßnahmen generell zu einer wesentlichen Verminderung der Energieverluste beitragen [...]“.

Genau hier besteht ein Konflikt dieser Rechtsverordnungen mit dem Bestandsschutz. Um einen Widerspruch im Recht zu vermeiden, wurden mit dem §5 EnEG die Ermächtigungsgrundlagen (§1-§3 EnEG) des Gesetzes durch einen Wirtschaftlichkeits-grundsatz eingeschränkt. Dieser besagt, daß die in den Verordnungen geforderten Maßnahmen wirtschaftlich vertretbar sein müssen. Das bedeutet, daß die getätigten Aufwendungen innerhalb der üblichen Nutzungsdauer durch die eingesparten Energiekosten erwirtschaftet werden können [Heye2004]. Für Fälle der unbilligen Härte sind nach EnEG, §5 Abs. 2 in den Rechtsverordnungen Befreiungstatbestände vorzusehen.

Auf diese Weise können Eigentümer trotz Bestandsschutz sehr wohl zu *wirtschaftlichen* Sanierungsmaßnahmen zur CO<sub>2</sub>-Reduzierung durch eine Rechtsverordnung verpflichtet werden.

Die Politik hat bisher darauf verzichtet, auf Basis einer Wirtschaftlichkeitsanalyse Sanierungsmaßnahmen durchzusetzen. Das mag auch daran liegen, daß nicht alle Sanierungsmaßnahmen im privaten Wohnungsbau per se wirtschaftlich sind. So bleibt die bestehende Förderpolitik eine „Zuckerbrot“-Politik, die nicht die erwünschten Ziele erreichen konnte.

Auch stehen der ökologischen Notwendigkeit, die bestehende Situation im Altbaubestand zu verbessern, nicht nur mangelndes Interesse oder Fehlinformationen entgegen. Die Entscheidung, energetisch zu sanieren, wird, wie regionale Untersuchungen [Schwickert2001] belegen, nicht ausschließlich nach Umwelt- und Behaglichkeitsaspekten, sondern im wesentlichen nach monetären Überlegungen getroffen. Eine langfristige Entlastung ist bei den oft hohen Investitionen i.d.R. nicht motivierend.

In [IfE2004] wurden eine Reihe von wärmetechnischen Maßnahmen am Gebäudebestand und deren Auswirkungen auf Energieeinsparung, Emissionsminderung und Folgekosten untersucht. Die Studie belegt u.a., daß die Maßnahmen hohe Mehrbelastungen für den Eigentümer verursachen und wirtschaftlich nicht tragbar sind. Eine Emissionsminderung auf diesem Wege im Gebäudesektor wird als unrealistisch eingeschätzt.

Den wirtschaftlich begründeten Hemmnissen bei Sanierungsaktivitäten scheint auch eine Verlagerung der Verantwortlichkeiten bei der Durchführung nicht entgegenzuwirken. Unter diesem Ansatz wurden im Zusammenhang mit dieser Arbeit Untersuchungen zur Relation zwischen den Investitionskosten und den erzielbaren CO<sub>2</sub>-Minderungen unter Einsatz erneuerbarer Energien zur Versorgung von Alt- und Neubaugebieten am Beispiel der hessischen Gemeinde Riedstadt durchgeführt. Dabei wurden u.a. die Alternativen zur Versorgung durch Biomasse, Photovoltaik und Windkraft betrachtet. Tabelle 1.1 gibt eine vergleichende Übersicht der Ergebnisse<sup>2</sup>.

Tabelle 1.1: Investitionen und CO<sub>2</sub>-Minderungspotentiale, dargestellt an der Gemeinde Riedstadt / Stand 2003 (HS: Heizstrom, NHS: Nichtheizstrom, EEG: Energieeinspeisung)

<i>Angaben</i>	<i>Nahwärme aus Biomasse</i>	<i>Photovoltaik<sup>3</sup> Dach / Parkflächen</i>	<i>Windkraft</i>
Ausstoß CO <sub>2</sub> in tCO <sub>2</sub> /a	87.000		
Vorkette CO <sub>2</sub> in tCO <sub>2</sub> (gemittelt)	12.000	21.750 (43.500)	27.480
Eff. CO <sub>2</sub> -Minderung in %	ca. 30 <sup>4</sup>	NHS: 8 (26) HS: -5 (16) 0%-EEG: 25 (70)	NHS: 47 HS: 81 100%-EEG: 78
Investition in Mio. Euro	ca. 29	95 (210)	48.5

Die Ergebnisse zeigen, daß selbst wenn Kommunen statt einzelner Bürger aktiv werden, einen Umstieg auf regenerative Energien zur Energieversorgung der Haushalte wagen und damit eine quasi „CO<sub>2</sub>-Neutralisierung“ anstreben, sehr hohe Investitionen notwendig werden. Diese wären bei der jetzigen finanziellen Lage der Länder und der Kommunen nicht durchsetzbar. Die Ergebnisse zeigen auch, daß durch die hohen CO<sub>2</sub>-Emissionen der Herstellung von Photovoltaik- und Windanlagen *keine* Neutralisierung möglich ist. Das erwartete hohe Ausmaß an ökologischer Effektivität bleibt aus. Diese Erkenntnis bestätigt die Wichtigkeit einer ganzheitlichen Betrachtungsweise bezüglich der gesamten ökologischen Effektivität einer Sanierungsmaßnahme

<sup>2</sup> Berechnungen unter Berücksichtigung der Darlehen und Stromeinspeisevergütung (Stand 2003)

<sup>3</sup> Deckungsrate an Heizstrom und Nichtheizstrom bei ca. 50 bis 60%

<sup>4</sup> Einsatz bei ca. einem Drittel (ca. 1622 Gebäude) der Riedstädter Wohngebäude

und bleibt bisher bei den Regierungsprogrammen und der Kreditvergabe weitgehend unberücksichtigt.

Energetische Sanierungsmaßnahmen zur Emissionsminderung im Gebäudebereich werden gefördert bzw. durchgeführt, unabhängig davon, ob die während der Lebensdauer bzw. Betriebsdauer eingesparten Emissionen diese von der Herstellung der Sanierungsmaterialien und -anlagen kompensieren. Die KfW verzichtet bei der Berechnung der CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten auf die Berücksichtigung des Energieaufwands und der damit verbundenen Emissionen zur Herstellung und Entsorgung der jeweiligen Erzeugungstechnologien. In [KfW2001] heißt es: *„Dies erfolgt aus pragmatischen Gründen, da eine Analyse aller vorgelagerten Prozeßketten einen unverhältnismäßig hohen Aufwand erfordern würde. Notwendig wäre nicht nur, zu untersuchen, welche Teilkomponenten und Zulieferungen in welchem Land hergestellt werden, sondern auch mit welchem Energieprozeß die jeweiligen Komponenten hergestellt werden...“*

Zu erneuerbaren Energien heißt es weiter: *„Bei Vernachlässigung von Teilen der über den gesamten Lebenszyklus, von der Herstellung bis zur Entsorgung, anfallenden Emissionen wird jedoch die Umweltverträglichkeit erneuerbarer Energien, die im Betrieb keine oder keine wesentlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen aufweisen, andererseits bei der Herstellung einen relativ hohen Energieaufwand aufweisen, überbetont. Bei der thermischen Nutzung von Biomasse wäre zudem grundsätzlich noch der Energie-Input für die Bereitstellung der Rohstoffe zu berücksichtigen...“*

Da die CO<sub>2</sub>-Minderung ein nationales Ziel ist, das in mehreren Zweigen der Verursachersektoren mit unterschiedlichen Strategien verfolgt wird (Herstellindustrie, Abnehmer, Verbraucher etc.), scheint eine ökologisch ganzheitliche Bewertung der Maßnahmen, hier am Gebäudebestand, sinnvoll und notwendig.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß der Altbaubestand große Potentiale für die Erreichung der Emissionsminderungsziele bietet. Sie heranzuziehen bedeutet, daß sie politisch und gesetzlich durchgesetzt werden müssen. Dies kann nur unter Wahrung des Wirtschaftlichkeitsgrundsatzes erfolgen. Es bedarf daher eines Instrumentes, das für die Eigentümer eine signifikante wirtschaftliche Motivation zur Sanierung herbeiführen kann. Der Aspekt einer ganzheitlichen Betrachtung der Maßnahmen sichert dabei eine ökologisch sinnvolle Vorgehensweise. Unter diesen Randbedingungen gilt es, einen neuen Ansatz zu finden.

## **2 Ziel und Aufbau der Arbeit**

### **2.1 Zielsetzung der Arbeit**

Ziel der Arbeit ist es, ein ökonomisch und ökologisch tragfähiges Konzept zur nachhaltigen Umsetzung emissionsmindernder Sanierungsmaßnahmen an Wohngebäuden zu entwickeln. Anhand eines Emissionshandels auf der Grundlage von CO<sub>2</sub>-Zertifikaten sollen Perspektiven für eine wirtschaftliche Umsetzung der ökologisch effektiven Sanierungsmaßnahmen im Wohngebäudesektor aufgezeigt werden.

Dazu werden die Sanierungsmaßnahmen auf ihr effektives CO<sub>2</sub>-Minderungspotential unter Einbeziehung der vorgelagerten Herstellungsprozesse geprüft und eine Wirtschaftlichkeitsanalyse durchgeführt. Auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse wird dargelegt, daß ein Zertifikatssystem ein Instrument zur wirtschaftlichen Motivation bei der Durchführung von CO<sub>2</sub>-Minderungsmaßnahmen im Altbausektor sein kann, um das bisher noch nicht ausgeschöpfte CO<sub>2</sub>-Minderungspotential im Gebäudesektor zu nutzen. Die Möglichkeiten der rechtlichen Rahmenbedingungen bzw. der Einbindung werden diskutiert. Desweiteren werden Vorschläge zur Implementierung und Überwachung sowie zum Ablauf des Handels formuliert.

### **2.2 Aufbau der Arbeit**

Kapitel 1 befaßt sich mit der Ausgangssituation dieser Arbeit. Einleitend werden die Problematik des Klimawandels und die damit verbundenen Herausforderungen erläutert. Anschließend wird ein Überblick über die bisherigen Verordnungen und Gesetze zur Energieeinsparung und CO<sub>2</sub>-Minderung in der Bundesrepublik Deutschland und der relevanten Bestimmungen auf internationaler Ebene gegeben. Die Bedeutung des Gebäudesektors, im speziellen die des Altbaubestands, für den Energieverbrauch und des damit einhergehenden CO<sub>2</sub>-Ausstoßes sowie sein CO<sub>2</sub>-Minderungspotential werden dargelegt. Es folgt eine Darstellung der bisherigen Beiträge des KfW-CO<sub>2</sub>-Gebäudesanierungsprogramms und der Energieeinsparverordnung zum nationalen Klimaschutz, sowie eine kurze Erläuterung des Contracting als Finanzierungsmodell für Energieeinsparmaßnahmen. Anschließend wird auf die wichtige Bedeutung einer nachhaltigen und ganzheitlichen Betrachtungsweise bei der Bilanzierung der erzielten CO<sub>2</sub>-Minderungen eingegangen. Aufbauend auf die vorausgegangenen Ausführungen wird abschließend die Notwendigkeit neuer Ansätze diskutiert, die Minderungspotentiale im Gebäudesektor durch die Mobilisierung von Sanierungsmaßnahmen auszuschöpfen.

Im Kapitel 2 werden das Ziel der Arbeit formuliert und der Aufbau der Arbeit dargestellt.

Da es sich um eine interdisziplinäre Arbeit handelt, werden im Kapitel 3 zur leichteren Orientierung relevante Grundlagen der Bauphysik sowie die Anforderungen und Instrumente der EnEV erläutert.

Im Kapitel 4 werden die Vorketten einer Vielzahl von Materialien und Produkten ermittelt, die für energetische Sanierungsmaßnahmen eingesetzt werden. Zunächst werden die Methodik und das verwendete Hilfsprogramm zur Erstellung der Öko-Bilanzen erläutert. Anschließend werden die Ergebnisse, getrennt nach baulichen und apparativen Sanierungsmaßnahmen, vorgestellt und diskutiert. Dabei geht es bei den baulichen Sanierungsmaßnahmen, um die produktionsbedingten einmaligen CO<sub>2</sub>-Emissionen eingesetzter Produkte und Stoffe. Die Ergebnisse hiervon werden zur leichteren Handhabung in Datenblättern (Anhang C) erfaßt. Bei den apparativen Sanierungsmaßnahmen geht es zusätzlich auch um die betriebsbedingten laufenden CO<sub>2</sub>-Emissionen der eingesetzten Anlagen und Energieträger.

Im Kapitel 5 werden die spezifischen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten von unterschiedlichen baulichen und apparativen Sanierungsmaßnahmen unter Berücksichtigung der Vorketten ermittelt. Diese dienen der Beurteilung der ökologischen Effektivität und der wirtschaftlichen Effizienz der Maßnahmen. Die ermittelten Vermeidungskosten können auf einfache Weise modifiziert werden, um verschiedene Szenarien zu Zins- und Laufzeitwirkung der Kredite erfassen zu können. Die Ergebnisse finden im anschließenden Kapitel 6 Anwendung.

Im Kapitel 6 wird ein Konzept entwickelt, um die CO<sub>2</sub>-Minderungen im Gebäudesektor handelbar zu machen und so die Nutzung der Potentiale zu mobilisieren. Es werden rechtliche, technische, wirtschaftliche und administrative Rahmenbedingungen abgesteckt.

Bei den rechtlichen Rahmenbedingungen geht es um Möglichkeiten zur Einbindung des Systems in die bestehenden gesetzlichen Regeln, ggf. ihre Ergänzung sowie mögliche Konflikte und ihre Lösungen. Bei den technischen Rahmenbedingungen werden die Grundlagen und die technisch mögliche CO<sub>2</sub>-Minderung ermittelt sowie geprüft, ob und an welchen Gebäuden eine Wirtschaftlichkeit des Systems zu erwarten ist. Die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen beinhalten die Wirtschaftlichkeitsanalyse des Systems und deren Sensitivitätsanalyse. Dies wird an einer repräsentativen Auswahl von Gebäuden exemplarisch durchgeführt. Die administrativen Rahmenbedingungen betreffen die Abwicklung des Handels. Im einzelnen werden Vorschläge zu Überwachung, Zuteilungsregelung und zum Ablauf des Handels formuliert. Wichtige Aspekte dabei sind die Transparenz des Handels und ein möglichst geringer administrativer Aufwand.

Anschließend wird im Kapitel 7 ein Vorschlag zur Umsetzung der Konsequenzen im Altbaubereich unter Einbeziehung des bestehenden CO<sub>2</sub>-Emissionshandels formuliert. An ausgesuchten Gebäudetypen werden die monetären Effekte von Sanierungsmaßnahmen in Abhängigkeit vom Zertifikatspreis aufgezeigt. Aufbauend darauf wird ein Vorschlag bezüglich der Förderung von Sanierungsmaßnahmen formuliert.

Im Kapitel 8 werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengefaßt und ein Ausblick gegeben.

Die Anhänge enthalten Datenmaterial für die hier getroffenen Analysen.

## 3 Grundlagen

### 3.1 Bauphysikalische Grundlagen

#### 3.1.1 Wärme

Durch die Differenz der Außen- und Innentemperaturen fließt Wärme in Richtung der niedrigeren Temperatur. Für eine behagliche Nutzung von Gebäuden und Räumen ist daher bei großen Temperaturdifferenzen, insbesondere im Winter, eine stete Wärmezufuhr erforderlich. Dabei hängt die Höhe der Wärmezufuhr von der Dämmqualität bzw. dem Zustand des Wärmeschutzes der wärmeabgebenden Gebäudehülle ab. Weitere Einflußfaktoren sind das individuelle Verhalten, die Geometrie des Gebäudes sowie die bestehende Anlagentechnik zur Raumkonditionierung. Die Anlagentechnik kann je nach Effizienz unterschiedlich hohe Verluste durch Umwandlung und Verteilung verursachen.

Wärme wird durch Leitung, Strahlung und Konvektion übertragen. Charakteristisch für die Bauphysik ist, daß alle Übertragungsmöglichkeiten im Kennwert der Wärmeleitfähigkeit des jeweiligen Baustoffes wiedergegeben werden. Die Wärmeleitfähigkeit beschreibt die Wärmemenge, die pro Sekunde durch 1 m<sup>2</sup> Oberfläche einer 1 m dicken homogenen Schicht und bei einer Temperaturdifferenz von 1 K fließt. Je kleiner die Wärmeleitfähigkeit ist, desto besser eignet sich der Baustoff zur Wärmedämmung. Es besteht i.d.R. ein direkter Zusammenhang zwischen der Rohdichte und der Wärmeleitfähigkeit eines Baustoffes. Baustoffe mit hoher Rohdichte sind bessere Wärmeleiter und daher schlechtere Wärmedämmstoffe.

Der Wärmedurchlaßwiderstand  $R$  beschreibt den Widerstand einer 1 m<sup>2</sup> großen Bauteilschicht der Dicke  $d$  gegenüber dem Wärmestrom, der sich bei einer Temperaturdifferenz von 1 K zwischen den Oberflächen einstellt. Er berechnet sich wie folgt:

$$(3.1) \quad R = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i}$$

mit

$R$       Wärmedurchlaßwiderstand des Bauteils in (m<sup>2</sup> K)/W

$d_i$       Dicke der i-ten Schicht in m

$\lambda_i$       Wärmeleitfähigkeit der i-ten Schicht in W/(m K).

Die Temperatursprünge an den Bauteiloberflächen werden durch die Wärmeübergangs-widerstände  $R_{si}$  und  $R_{se}$  berücksichtigt. Ihre Größe hängt u.a. davon ab, ob das betrachtete Bauteil an sich bewegende Luft angrenzt oder nicht. Der Wärmedurchgangswiderstand  $R_T$  ergibt sich aus der Summe aller Wärmedurchlaß- und Wärmedurchgangswiderstände.

$$(3.2) \quad R_T = R_{si} + R + R_{se}$$

Als Maß für den stationären Wärmedurchgang durch die Schichten eines Bauteils infolge Wärmeleitung bzw. Wärmeübergang an den Grenzoberflächen gilt der Wärmedurchgangskoeffizient  $U$ , der Kehrwert des Wärmedurchgangswiderstands  $R_T$ . Er beschreibt die Wärmemenge, die durch eine 1 m<sup>2</sup> große Bauteilfläche und bei einer Temperaturdifferenz von 1 K fließt. Je höher

der U-Wert ist, desto mehr Wärme fließt durch die Bauteile durch und geht somit verloren. Als Folge muß mehr Heizwärme bzw. Raumwärme zugeführt werden, um eine konstante, behagliche Innenraumtemperatur sicher zu stellen.

### 3.1.2 Heizwärmebedarf

Als Heizwärmebedarf wird die Wärmemenge bezeichnet, die einem Raum zugeführt werden muß, damit eine bestimmte Rauminnentemperatur sichergestellt wird. Er ergibt sich aus der Differenz zwischen Wärmeverlusten und Wärmegewinnen. Wärmeverluste setzen sich aus Transmissions- und Lüftungswärmeverlusten zusammen.

Bei den Transmissionswärmeverlusten strömt Wärme durch Bauteile der Gebäudehülle aufgrund des Temperaturunterschiedes und durch Schwachstellen wie Wärmebrücken nach außen. Bei den Lüftungswärmeverlusten gelangt warme Raumluft durch Fensterlüftung oder mechanische Lüftung nach außen.

Innerhalb des Wärmehaushaltes eines Gebäudes stellen die Transmissionswärmeverluste den größten Anteil an den Wärmeverlusten dar. Dabei können die Wärmeverluste durch Transmission durch eine kompakte Bauweise und hohe wärmeschutztechnische Qualität der Außenbauteile begrenzt werden. Die Transmissionswärmeverluste lassen sich aus dem Produkt der Wärmedurchgangskoeffizienten der Bauteile, der Bauteilfläche und der Heizgradtagzahl berechnen.

Verbesserte Wärmedämmeigenschaften der Gebäudehülle können durch den Einsatz von Baustoffen und Konstruktionen mit kleinerem Wärmedurchgangskoeffizient  $U$  erreicht werden. Die jährliche Heizwärmeeinsparung, hier als  $\Delta Q$  bezeichnet, nach der Sanierung einer 1 m<sup>2</sup> großen Fläche eines Bauteils ergibt sich zu:

$$(3.3) \quad \Delta Q = (U_{alt} - U_{neu}) F_{xi} F_{GT}$$

mit

$\Delta Q$      Jährliche Heizwärmeeinsparung für eine Bauteil-Referenzfläche von 1 m<sup>2</sup> in kWh/a

$U_{alt}$      Wärmedurchgangskoeffizient im unsanierten Zustand in W/(m<sup>2</sup>K)

$U_{neu}$      Wärmedurchgangskoeffizient im sanierten Zustand in W/(m<sup>2</sup>K)

$F_{xi}$      bauteilabhängiger Temperaturkorrekturfaktor nach [EnEV2004/Anhang 1/Tab. 3]

$F_{GT}$      Mittlere Heizgradtagzahl, wird zu 66 kWh/a angesetzt (bei 3,3 °C als Außen-, 19 °C als Innentemperatur und einer Heizperiode von 185 Tagen).

### 3.1.3 Heizenergiebedarf

Der Heizenergiebedarf eines Gebäudes entspricht der Energiezufuhr, die das Heizungssystem bereitstellen muß, um den Heizwärmebedarf und die Warmwasserbereitung sicherzustellen. Er ergibt sich aus der Summe der beiden und den Verlusten aus Umwandlung und Verteilung innerhalb der Gebäudehülle. Dabei spielen die Technik des bestehenden Heizungssystems sowie der Zustand des Verteilungssystems eine wichtige Rolle.

Effiziente Heizsysteme zeichnen sich u.a. durch einen hohen Wirkungsgrad der Heizungsanlage, einen hohen Heizwert des Energieträgers, ein gut gedämmtes und modernes Verteilungssystem aus. Auch die eingesetzte Technologie bei der Umwandlung der Energieträger in Wärme übt Einfluß aus. Die Brennwerttechnologie und das Kraft-Wärme-Koppelungsprinzip zählen zu den effizientesten Techniken.

Bei der Brennwerttechnologie wird der beim Verbrennungsprozeß entstandene Wasserdampf durch eine niedrige Rücklauftemperatur abgekühlt und kondensiert. Die dabei freiwerdende Wärme wird genutzt. Bei dem Kraft-Wärme-Koppelungs-Prinzip werden Wärme und Strom gleichzeitig erzeugt. Die Anlagen dazu, die Blockheizkraftwerke (BHKW), können sowohl Wärme oder Strom orientiert betrieben werden. Wärme orientierte BHKW's erzeugen primär Wärme, Strom orientierte primär Strom. Das sekundäre Produkt kann entweder im gleichen Haushalt genutzt oder ins Netz eingespeist werden. Betrieben werden die Anlagen mit Öl oder Erdgas. Innovative Ansätze wie ein Betrieb mit Biomasse (Pellets) auf der Basis eines Stirlingmotors sind Gegenstand der Entwicklung.

Blendet man bei der Durchführung energetischer Sanierungsmaßnahmen Ziele der Gestaltung, der Schaffung von Wohnraum und der Bauschädenbehebung aus, liegt das primäre Ziel einer Sanierung in der Reduzierung des Heizwärme- und/oder Heizenergiebedarfs und der damit einhergehenden Senkung der Heizkosten. Dabei empfiehlt es sich je nach Gebäudezustand, zunächst eine Verbesserung der Wärmedämmung der Gebäudehülle zu realisieren und erst dann den Umstieg auf effizientere Heiztechnik vorzunehmen. Ersteres führt zur Senkung des Heizwärmebedarfs, letzteres zur Senkung des Heizenergiebedarfs.

### **3.1.4 Primärenergiebedarf**

Die Relevanz des Primärenergiebedarfs für den Wohngebäudesektor ist erstmalig mit der Verabschiedung der Energieeinsparverordnung eingeführt worden. Bis dahin wurde die Begrenzung des Energiebedarfs auf der Basis der Nutzenergie vorgenommen. Der Primärenergiebedarf berücksichtigt über den Energiebedarf hinaus die Gewinnung und die Umwandlung des Energieträgers bei der Herstellung, sowie die Verluste bis zur Systemgrenze Gebäudekante. Solche Effekte werden durch die sogenannte Anlagenaufwandszahl  $e_p$  [EnEV2004/DIN V 4701-10] eines Heizsystems mit berücksichtigt. Der Primär-Energiebedarf stellt damit eine neuere, ganzheitlichere Beurteilungsgröße dar.

### **3.1.5 $A/V_e$ -Verhältnis**

Das Verhältnis der beheizten Fläche zum beheizten Volumen, das  $A/V_e$ -Verhältnis, beschreibt die Kompaktheit eines Gebäudes. Gebäude mit großem  $A/V_e$ -Verhältnis, z.B. Bungalows, verfügen über eine große wärmeumhüllende Außenfläche und haben dadurch größere Transmissionswärmeverluste. Umgekehrt verlieren Gebäude mit kleinem  $A/V_e$ -Verhältnis weniger Wärme über die vergleichsweise kleinere Gebäudehülle. Die Aufgabe des Planers im Hinblick auf den Wärmeschutz eines Gebäudes besteht nicht zuletzt darin, eine ausgewogene und kompakte Gebäudegeometrie zu finden, die die Wärmeverluste nach außen senkt.

## **3.2 Einige Regelungen der Energieeinsparverordnung (EnEV)**

### **3.2.1 Anforderungen der EnEV an zu errichtende Gebäude**

Die EnEV faßt die Wärmeschutzverordnung und die Heizanlagenverordnung zusammen und stellt Anforderungen an den Neubau und den Bestand. Erstmals schreibt die EnEV die Begrenzung des Jahresprimärenergiebedarfs für Heizung und Warmwasser vor und führt damit eine ganzheitliche Größe ein. Zur Einhaltung dieser Größe können bauliche und wärmeschutztechnische Eigenschaften des Gebäudes sowie die Anlagentechnik und die eingesetzten Energieträger beitragen [Messari2001].



Die Anforderungen an den Neubau entsprechen dabei dem Niedrigenergiehaus-Standard (70 kWh/(m<sup>2</sup>a)) (s. Abbildung 3.1).

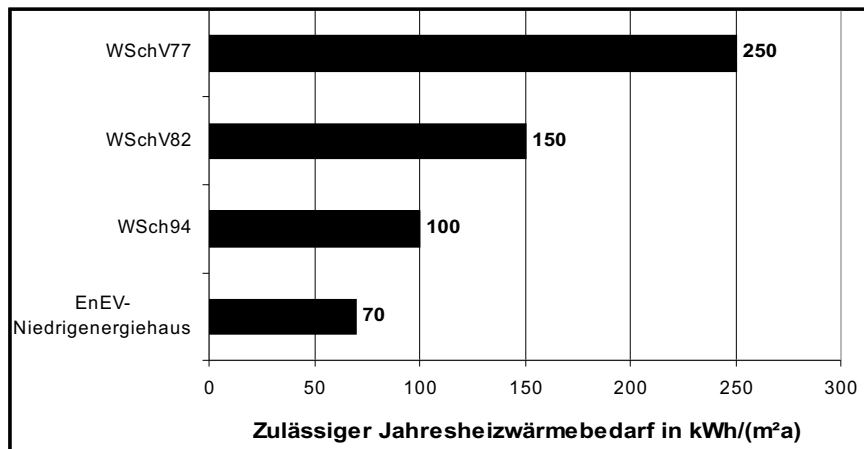


Abbildung 3.1: Zul. Jahresheizwärmebedarf in kWh/(m<sup>2</sup>a) nach WSchV und EnEV

Der Nachweis nach der EnEV bedient sich dabei Informationen zur Wärmedämmung der Umfassungsfläche (Außenwände, Fenster, Kellerdecke, Obergeschoßdecke bzw. Dach), der Durchlässigkeit der Fenster für Sonnenstrahlen und damit Angaben zu solaren Warmegewinne, Angaben zu internen Warmegewinnen, sowie zur Effizienz der Anlagentechnik und des eingesetzten Energieträgers.

Es wird zwischen Gebäuden mit normalen und niedrigen Innentemperaturen unterschieden. Für beide Klassen muß die Einhaltung des spezifischen Transmissionswärmeverlustes nachgewiesen werden, abhängig vom A/V<sub>e</sub>-Verhältnis des Gebäudes und vom Anteil der Fensterfläche. Der spezifische Transmissionswärmeverlust beschreibt den durchschnittlichen Wärmedurchgangskoeffizienten der Gebäudehülle und soll einen Mindestwärmeschutz garantieren. Bei Gebäuden mit normalen Innentemperaturen ist zusätzlich die Einhaltung des zulässigen Jahresprimärenergiebedarfs nachzuweisen, auch abhängig vom A/V<sub>e</sub>-Verhältnis.

### 3.2.2 Anforderungen der EnEV an bestehende Gebäude und Anlagen

Bisher betrafen Verordnungen zur Energieeinsparung in privaten Haushalten im wesentlichen Neubauten und stellten an bestehende Gebäude sogenannte bedingte Anforderungen.

Im Abschnitt 3, §8 der [EnEV2004] werden Anforderungen bei Änderungen von Gebäuden und in §9 Nachrüstungsanforderungen bei Anlagen und Gebäuden formuliert. Bei Änderungen von Gebäuden (gemäß EnEV, Anhang 3 Nr. 1 bis 6), die mehr als 20% der Bauteilflächen gleicher Orientierung betreffen, sind Grenzwerte des Wärmedurchgangskoeffizienten nach [EnEV2004, Anhang 3, Tabelle 1] einzuhalten. Überschreitet der durchschnittliche Wärmedurchgangskoeffizient des Gebäudes um nicht mehr als 40% die Grenzwerte des Neubaus, gilt diese Anforderung als erfüllt.

Die Nachrüstungsanforderungen an Gebäude und Anlagen in §9, Absatz (1) bis (3) beinhalten den Austausch von Heizkesseln, die vor 1978 eingebaut wurden, die Dämmung von zugänglichen Wärme- und Warmwasserleitungen in beheizten Räumen und die Dämmung der Obergeschoßdecke, so daß der Wärmedurchgangskoeffizient 0,30 W/(m<sup>2</sup>K) nicht überschreitet. Bei Wohngebäuden mit nicht mehr als 2 Wohneinheiten, von denen eine zum Zeitpunkt des

Inkrafttretens der Verordnung vom Eigentümer selbst bewohnt wird, sind die erläuterten Anforderungen nur im Falle eines Eigentümerwechsels zu erfüllen.

### 3.2.3 Energieausweis

Der Energieausweis von Gebäuden wird von der EU-Richtlinie 2002/91/EG über die Gesamteffizienz von Gebäuden gefordert [EG2002]. Mit der für 2006 angekündigten Verabschiedung der Neufassung der EnEV wird seine Erstellung auch für bestehende Gebäude zur Pflicht.

Der Energieausweis soll energiebezogene Merkmale eines Gebäudes dokumentieren, die ggf. bei wesentlichen Änderungen erneut zu erfassen sind. Diese sind u.a. Angaben zur Geometrie, zur Anlagentechnik, zum Jahresprimärenergiebedarf, zum Endenergiebedarf und zu den durchschnittlichen Wärmeverlusten über die Gebäudehülle. Geometrische Angaben sind z.B. die wärmeübertragende Umfassungsfläche, das beheizte Gebäudevolumen, das  $A/V_e$ -Verhältnis und die Gebäudenutzfläche. Die Wärmeverluste werden über den spezifischen Transmissionswärmeverlust beschrieben, während die Anlagenaufwandszahl eine Information über die Gesamteffektivität der eingesetzten Anlagentechnik liefert.

Eine Einführung des Energieausweises für bestehende Gebäude ist jedoch aufgrund fehlender Einigung über seine Gestaltung bisher noch nicht erfolgt. Dabei ging es in der Diskussion darum, ob ein Energieausweis auf Verbrauchs- oder Bedarfsdaten basieren soll. Beide Varianten haben Vor- und Nachteile, die hier im folgenden nur kurz erläutert werden.

Ein auf Verbrauchsdaten basierender Energieausweis hält lediglich die Daten zum Energieverbrauch eines Gebäudes fest. Das erfolgt auf der Grundlage von Rechnungen zu den Energiekosten. Der individuelle Einfluß der Bewohner auf die Verbrauchsdaten, z.B. durch Lüftungsgewohnheiten und bevorzugte Raumtemperatur, wird dabei außer Acht gelassen. Daten zum wärmeschutztechnischen Gebäudezustand oder zur Anlagentechnik werden nicht festgehalten [IFEU2005]. So kommt es überwiegend zur Bewertung des Nutzers und nicht des Gebäudes. Ein Vergleich mit anderen Gebäuden ist kaum möglich. Der Vorteil des Energieverbrauchsausweises liegt in der Einfachheit der Erstellung und der dadurch geringen Kosten.

Dagegen hält ein Bedarfsenergieausweis den wärmeschutztechnischen Zustand des Gebäudes sowie die Effizienz des eingesetzten Energieträgers und der Anlagen fest. Der Einfluß der Bewohner wird hier ausgeschaltet; das Gebäude kann mit anderen Gebäuden verglichen und bewertet werden. Die Erfassung bzw. Ermittlung der Daten ist aufwendig und verursacht höhere Kosten. Dies ist insbesondere der Fall bei fehlenden Bau- und Konstruktionsplänen. Die Kosten zur Erstellung des Bedarfsenergieausweises werden nach [IFEU2005] zwischen 250 bis 600 Euro pro Haus und Ausweis beziffert und steigen in dieser Spanne mit der Anzahl der Wohneinheiten pro Haus.

Der Zeitpunkt der Einführung des Energieausweises für den Gebäudebestand ist noch nicht festgelegt worden. Eigentümer und Vermieter sollen ein Optionsrecht haben und zwischen Bedarfs- und Verbrauchsausweis wählen können [BMWi/BMVBS2006].

## 3.3 Betriebswirtschaftliche Grundlagen - Investitionsrechnung

### 3.3.1 Statische Verfahren

Bei den Investitionsrechnungen wird zwischen statischen und dynamischen Verfahren unterschieden. Statische Verfahren sind vereinfachte Verfahren, die zum Vergleich von Investitionsalternativen mit gleichem Kapitaleinsatz und gleicher Laufzeit genutzt werden.

Zu den statischen Verfahren zählen die Gewinnvergleichs- bzw. Kostenvergleichsrechnung, die Rentabilitätsvergleichsrechnung und die statische Amortisationsrechnung. Vorteile der statischen Verfahren sind die einfache Handhabung und der relativ geringe Informationsbedarf. Dagegen findet keine Berücksichtigung des unterschiedlichen zeitlichen Auftretens von Kosten und Erlösen statt; ein Vergleich mit alternativen Kapitalanlagen ist oft nicht möglich.

### 3.3.2 Dynamische Verfahren

Die dynamischen Verfahren der Investitionsrechnung berücksichtigen die zeitlich unterschiedlich anfallenden Zahlungs- und Erlösstöme. Diese werden mit Hilfe der Zinseszinsrechnung auf einen gemeinsamen Vergleichszeitpunkt ab- oder aufdiskontiert. Der Zeitpunkt des Zahlungsstroms übt somit Einfluß auf das Gesamtergebnis aus. Dynamische Verfahren sind die Kapitalwertmethode, die Annuitätenmethode und die interne Zinsfußmethode.

Bei der *Kapitalwertmethode* wird eine Investition anhand ihres Kapitalwertes KW beurteilt. Dieser ist die Summe aller mit einem bestimmten (gewünschten) Kalkulationszinssatz auf den Zeitpunkt  $t = 0$  diskontierten Investitionszahlungen. Weist die Investition einen  $KW > 0$  auf, ist sie vorteilhaft. Die optimale Investitionsalternative ist die mit dem größten positiven KW.

Mit der *internen Zinsfußmethode* wird der interne Zinsfuß (Zinssatz) berechnet, für den der Kapitalwert einer Investition zu 0 wird. Eine Investition ist vorteilhaft, wenn der interne Zinsfuß über dem Kapitalmarktzinssatz liegt.

Die *Annuitätenmethode* verwendet als Beurteilungskriterium nicht die Höhe des Kapitalwertes, sondern die Höhe der sich daraus ergebenden Annuität. Die Annuität  $Z$  kann ermittelt werden, in dem der Kapitalwert der Investition mit dem sog. Annuitätenfaktor  $a_{i,n}$  multipliziert und so auf die Nutzungsperioden der Investition verteilt wird (3.4):

$$(3.4) \quad Z = KW a_{i,n}$$

mit

$Z$       Jährliche Annuität in €/Periode

$KW$       Kapitalwert der Investition in €/Jahr

$a_{i,n}$       Annuitätenfaktor für einen gegebenen Kalkulationszinssatz in %/100 und eine gegebene Nutzungsdauer in Jahren nach (3.5)

$$(3.5) \quad a_{i,n} = \frac{i(1+i)}{(1+i)^n - 1}$$

mit

$i$       Kalkulationszinssatz in %/100

$n$       Nutzungsdauer in Jahren.

Nach der Annuitätenmethode ist eine Investition positiv zu beurteilen, wenn die Annuität größer als Null ist.

Bei energetischen Sanierungsmaßnahmen mit dem Ziel Energie einzusparen und klimaschädliche Emissionen zu mindern, handelt es sich um Investitionen mit unterschiedlichen Kapitaleinsätzen, unterschiedlichen Rückflüssen und mehrperiodigen Betrachtungen, bei denen Zinseffekte und die zeitliche Struktur der Ein- und Auszahlungsflüsse zu berücksichtigen sind. Daher werden in dieser

Arbeit dynamische Verfahren der Investitionsrechnung angewandt. Gewählt wurde hier die Annuitätenmethode.

### 3.4 Umweltökonomische Grundlagen

#### 3.4.1 Externe Effekte

In der Ökonomie unterscheidet man zwischen *internen* und *externen* Effekten. „Eine ökonomische Situation weist einen externen Effekt im Konsum auf, wenn eine Konsumentin direkt durch die Produktion oder den Konsum eines anderen Akteurs berührt wird“ [Varian2004]. Bei externen Effekten geht es um Güter, für die aufgrund fehlender Eigentumsrechte kein Markt existiert.

Externe Effekte können technologischer Art (im Konsum und Produktion), psychologischer Art (Person A freut sich, daß es Person B gut geht) und pekuniärer Art (gewünschte Marktdynamik; der Computer löste die Schreibmaschine ab) sein.

Externe Effekte können also sowohl positiver als auch negativer Art sein. Positive Effekte sind z.B. die externen Effekte von Grundlagenforschung. In der Umweltökonomie trifft man überwiegend auf negative externe Effekte. Zu nennen sind die Belastung der Ozonschicht, Lärm, Landschaftszerstörung und die Umweltverschmutzung. Ohne gewollten Erwerb ist man gezwungen, z.B. das „Produkt“ CO<sub>2</sub> zu „konsumieren“.

Externe Effekte verursachen Kosten für die Gesamtgesellschaft. Diese können aus verschiedenen Schadensgebieten herrühren. Als Beispiele seien hier Gesundheitsschäden, Schäden infolge Klimaänderung und Umweltkatastrophen, Schäden an Gebäuden und Denkmälern und Umweltschäden genannt.

#### 3.4.2 Quantifizierung externer Kosten

##### 3.4.2.1 Schadenskostenansatz

Bei dem Schadenskostenansatz werden die Kosten der Schäden, die durch externe Effekte verursacht werden, abgeschätzt. Theoretisch könnten CO<sub>2</sub>-Schadenskosten als Indikator zur Bestimmung eines „optimalen CO<sub>2</sub>-Emissionsniveaus“ dienen, aber dazu ist das Verfahren mit großen Unsicherheiten behaftet.

Die Studie „External Costs of Energy (ExternE)“ der Europäischen Union ist die bisher umfangreichste Untersuchung zur Quantifizierung externer Kosten. Das Deutsche Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR) veröffentlichte im April 2006 unter Einbezug dieser Studie folgende Schätzwerte der externen Kosten der Stromerzeugung, basierend auf den Schadenskostenansatz (Tabelle 3.1).

Tabelle 3.1: Externe Kosten von Stromerzeugung nach [DLR/ISI2006]  
(GuD: Gas und Dampfkraftwerk)

<i>Stromerzeugung</i>	<i>Externe Kosten in Cent/kWh</i>
Modernes GuD-Kraftwerk	0,75
Strom aus Kohle	1,5 bis 2
Strom aus Wind und Wasserkraft	0,05 bis 0,1

### 3.4.2.2 Vermeidungskostenansatz

Bei dem Vermeidungskostenansatz werden die Kosten zur Vermeidung, also zur Prophylaxe ermittelt. Energetische Sanierungsmaßnahmen zur CO<sub>2</sub>-Minderung im Gebäudesektor können als Prophylaxe-Maßnahmen angesehen werden. Ihre Kosten sind interner, der Nutzen (auch) externer Art. In dieser Arbeit stehen die CO<sub>2</sub>-Minderungspotentiale im Gebäudesektor und ihre Mobilisierung im Vordergrund; die Eigentümer sollen aktiv werden. Während der Schadenskostenansatz lediglich eine „monetäre Abgabe“ zur Beseitigung der Schäden als Ergebnis haben kann und dabei mit sehr vielen Unsicherheiten behaftet ist, liefert der Vermeidungskostenansatz eine für den Eigentümer nachvollziehbarere Größe, an der er sich besser orientieren kann.

Die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten eignen sich besser sowohl als Indikator der gesellschaftlichen Zahlungsbereitschaft für die Vermeidung zukünftiger Schäden als auch, bei einem definierten CO<sub>2</sub>-Minderungsziel, zur Bewertung von Strategien zur CO<sub>2</sub>-Vermeidung. In dieser Arbeit wird der Vermeidungskostenansatz angewandt.

### 3.4.3 Das Coase-Theorem

Mit seinem Aufsatz „The Problem auf Social Cost“ [Coase1960] hat der englische Ökonom und Nobelpreisträger Ronald H. Coase den Grundstein für die Allokationstheorie, später das Coase-Theorem genannt, gelegt.

Das Coase-Theorem besagt, daß unter bestimmten Voraussetzungen durch Verhandlung zwischen den betroffenen Wirtschaftssubjekten ein optimales Niveau von externen Effekten erzielt werden kann, unabhängig davon, wem ursprünglich die Nutzungsrechte zugesprochen wurden [Fees1997]. Voraussetzung der Umsetzung dieser Theorie in die Praxis ist die Zuteilung von Nutzungs- bzw. Eigentumsrechten. Gegenwärtig werden auf Grundlage dieser Theorie Steuerungsmaßnahmen mit konkreten CO<sub>2</sub>-Minderungszielen durchgeführt. Der bestehende CO<sub>2</sub>-Emissionshandel in der Industrie basiert auf der Zuteilung von begrenzten Zertifikaten, die die Verursacher erwerben können.

## 4 Ermittlung der material- und betriebsbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen bei Sanierungsmaßnahmen

### 4.1 Allgemeines

Das Emissionsminderungspotential steht bei der Förderung und der Gesetzgebung bezüglich der Sanierungsmaßnahmen im Gebäudebereich im Vordergrund. Eine Bewertung der Maßnahmen bezüglich ihrer ökologischen Gesamteffektivität wird jedoch weitgehend unterlassen. Bisherige Untersuchungen auf diesem Gebiet [EyeRein2000], insbesondere zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen der Herstellungsprozesse, können nur bedingt in dieser Arbeit genutzt werden. Zum einen bieten sie keine breite Datenbasis der untersuchten Baustoffe und Anlagen, z.B. bei Dämmstoffen und zusammengesetzten Baukonstruktionen. Zum anderen handelt es sich fast immer um andere Systemgrenzen als die, die für diese Arbeit festgelegt wurden.

In diesem Kapitel werden die material- und betriebsbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen bei unterschiedlichen Sanierungsmaßnahmen ermittelt. Die Ergebnisse gehen in die Szenarien des Kapitels 5 ein. Abbildung 4.1 stellt den Bilanzraum der Untersuchungen dar. In Variante A wird keine Sanierung durchgeführt. In Variante B wird eine Sanierung durchgeführt. Damit weist der Betrieb niedrigere Emissionen als in Variante A auf. Dabei wird zwischen baulichen und apparativen Sanierungsmaßnahmen unterschieden.

Bei baulichen Maßnahmen erfolgt eine Dokumentation der Bilanzwerte von zusammengesetzten Konstruktionsalternativen in den sog. Datenblättern (Anhang C). Bei den apparativen Maßnahmen handelt es sich um den Austausch der Heizungssysteme. Es wird daher eine differenzierte Untersuchung der Vorketten von Anlagen und Energieträgern durchgeführt.

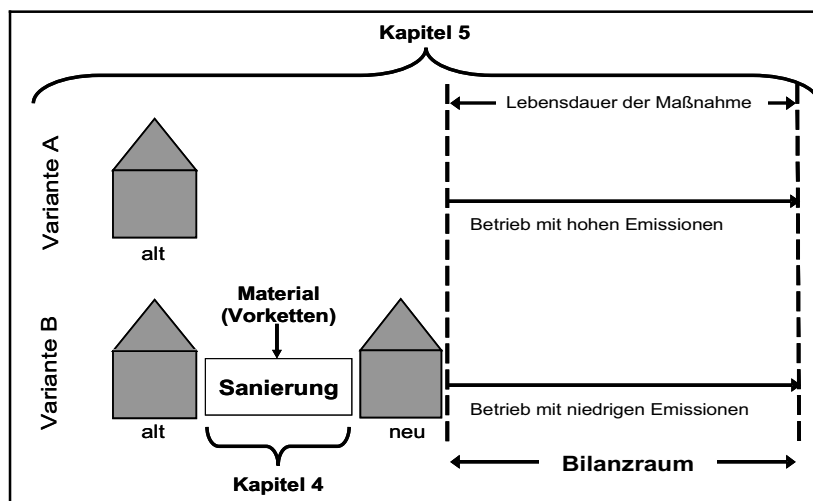


Abbildung 4.1: Bilanzraum der Untersuchungen

## 4.2 Methodik

### 4.2.1 Öko-Bilanzen

Unter einer Öko-Bilanz (engl. LCA - Life Cycle Assessment) wird eine systematische Analyse von Produkten, Stoffen und Prozessen unter ökologischen Gesichtspunkten verstanden.

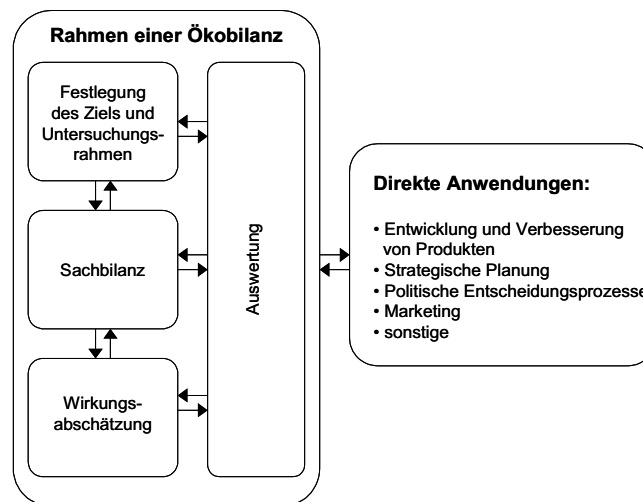


Abbildung 4.2: Aufbau einer Ökobilanz [EN ISO 14040]

Sie analysiert den gesamten Lebensweg eines Produktes, die zugehörigen ökologischen Auswirkungen und die daraus resultierende Umweltbelastung. Der Begriff Ökobilanz ist ausschließlich auf produktbezogene Ökobilanzen anzuwenden [EN ISO 14040]. Abbildung 4.2 gibt den Aufbau einer Öko-Bilanz wieder. Zunächst werden Ziel und Untersuchungsrahmen festgelegt. Im Untersuchungsrahmen werden die Funktion eines Systems innerhalb des Gesamtsystems sowie seine funktionelle Einheit festgelegt, auf die die Wirkungskategorien bezogen werden. Wirkungskategorien können z.B. der Beitrag zum Treibhauseffekt oder zum Ozonloch sowie anfallende Emissionen sein. Anschließend wird eine Sachbilanz mit den relevanten Input- und Outputflüssen des Untersuchungsobjektes erstellt. In der darauf folgenden Wirkungsabschätzung werden die ökologischen Auswirkungen auf der Grundlage von wissenschaftlich festgelegten Vergleichsgrößen abgeschätzt.

Es folgt die Bewertung, die die Auswertung der Wirkungsabschätzung und der Sachbilanz bedeutet. Eine Zusammenfassung und kritische Prüfung bilden den Abschluß.

### 4.2.2 Das Programm GEMIS

Für die Erstellung einer Öko-Bilanz stehen mittlerweile einige Modellierungshilfen zur Verfügung. Als Beispiele seien die Programme GaBi und Umberto genannt. Beide Programme sind an Universitäten und Forschungsinstitutionen entwickelt worden und sind kostenpflichtig. Sie ermöglichen produkt- und betriebsbezogene Ökobilanzen und detaillierte Stoffstromanalysen.

Die in dieser Arbeit verwendeten Öko-Bilanzen wurden mit Hilfe des Programms GEMIS (Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme) erstellt, basierend auf geltenden Regelwerken. Es handelt sich dabei um ein Rechen- und Modellierungsprogramm zur Umwelt- und Kostenanalyse von Energie-, Stoff- und Transportprozessen und ihrer Lebenswege. Das Programm wurde vom Öko-Institut in Darmstadt und der Gesamthochschule Kassel entwickelt und steht der

Öffentlichkeit kostenlos zur Verfügung. Beteiligt an seiner Entwicklung waren das Land Hessen, die Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit, das Umweltbundesamt, die Bundesministerien für Forschung sowie Umwelt, das US-Energieministerium und die Weltbank. GEMIS ermöglicht die Erfassung kompletter „Lebenswege“ von der Primärenergie- und Rohstoff-Gewinnung bis zur Nutzung eines Stoffes oder Produktes. Dabei bezieht es Hilfsenergien und Materialaufwand zur Herstellung von Anlagen und Transportsystemen und die finale Entsorgung ein und greift auf eine eigene Datenbank mit Daten zu Energieträgern, Wärme und Strom, Stoffbereitstellung und Transporten zurück. Mit GEMIS lassen sich sowohl globale als auch geografisch begrenzte Prozesse abbilden. In dieser Arbeit wurde die Version [GEMIS4.3] verwendet.

### 4.3 Systemgrenzen / Abschneidekriterien

Die sog. Systemgrenzen einer Öko-Bilanz beschreiben Rahmenbedingungen. Diese betreffen den Bilanzhorizont für die betrachteten Prozesse, den Betrachtungszeitraum sowie wichtige Annahmen bzw. Vereinfachungen. Für diese Arbeit werden folgende Festlegungen getroffen. Ihre Begründungen finden sich in den ökologischen und den ökonomischen Betrachtungen dieser Arbeit.

- **Festlegung der funktionellen Einheiten**

Tabelle 4.1 gibt eine Übersicht über die für diese Arbeit festgelegten funktionellen Einheiten.

Tabelle 4.1: Funktionelle Einheiten der Untersuchungsobjekte

<i>Untersuchungsobjekt</i>	<i>Funktionelle Einheiten</i>
Baustoffe/ Bauhilfsstoffe (s. 4.4.2-4)	1 kg bzw. 1 m <sup>3</sup>
Fenster (s. 4.4.5)	1 m <sup>2</sup>
Energieträger (s. 4.5.5)	1 kWh Heizwert
Heizungsverteilungssysteme (s. 4.5.2)	1 kW
Anlagen (s. 4.5.3-4)	1 kW Leistung bzw. 1 kWh Raumwärme

- **Wirkungskategorie**

Als Wirkungskategorien werden das CO<sub>2</sub>-Äquivalent und der kumulierte Energieaufwand KEA herangezogen. Letzterer wird getrennt nach erneuerbarem KEA<sub>e</sub> und nicht erneuerbarem Anteil KEA<sub>ne</sub> aufgewiesen. Da es in dieser Arbeit in erster Linie um die CO<sub>2</sub>-Minderung geht, konzentrieren sich die Analysen dementsprechend auf die CO<sub>2</sub>-Äquivalente.

- **Betrachtungshorizont**

Als geographischer Bilanzhorizont wird Deutschland festgelegt. Dies erfolgt nicht nur aus datenbeschaffungstechnischen Gründen, sondern findet im später konzipierten Emissionshandel für den deutschen Gebäudesektor eine weitere Begründung. Es werden nur die CO<sub>2</sub>-Minderungen handelbar gemacht, die auf nationaler Ebene erzielt werden. Daher werden Auslandsprozesse in den Vorketten ausgegliedert.

- **Transportwege und Bauprozesse**

Es werden ausschließlich emissionsfördernde Prozesse bis zur Fertigstellung (Werkstor) berücksichtigt, d.h. materialbedingte wie Rohstoffgewinnung, Verarbeitung und Herstellung sowie zusätzlich bei Anlagen und Energieträgern die betrieblichen Emissionen.



Nach [Stritz1994] sind die durch durchschnittliche Transportwege und Bauprozesse entstehenden Umweltbelastungen im Vergleich zu denen aus dem Herstellungsprozeß viel geringer und demnach vernachlässigbar. Transporte außerhalb des Werkstors werden deshalb außer bei Gas-Pipelines, Brennstoffwegen (z.B. Heizöl, Biomasse) und Leitungsaufwand für Strom nicht berücksichtigt.

- **Hilfsmaterialien und Hilfsenergie**

Hilfsmaterialien, die bei vielen Sanierungsmaßnahmen erforderlich sind (z.B. Dübel, Schrauben, Nägel etc.) werden aufgrund ihres vernachlässigbaren Anteils nicht berücksichtigt. Der Energieaufwand und die Emissionen, die durch Bauarbeiten auf der Baustelle (Bohren, Sägen, Verleimen etc.) anfallen bzw. verursacht werden, sind hier ebenfalls nicht berücksichtigt worden.

Die Hilfsenergie zum Betrieb von Anlagen, z.B. die Zündenergie oder Strom für Bediengungsdisplays von Heizungsanlagen, wird weder aus bestehenden GEMIS Prozessen ausgegliedert noch berücksichtigt.

- **Behandlung der Entsorgungsphase**

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die entsorgungsbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen nicht berücksichtigt. Damit werden sowohl Belastungs- als Nutzungseffekte nicht untersucht. Dieser Schritt betrifft CO<sub>2</sub>-Träger, Metalle und mineralische Stoffe. Bei den CO<sub>2</sub>-Trägern ist das z.B. eine energetische Nutzung, bei Metallen das Recycling und bei mineralischen Stoffen ebenfalls das Recycling, die Ressourcenschonung sowie die Deponierung. Im folgenden werden einige Aspekte näher diskutiert.

Nach [Stritz1994] liegen die durch den Rückbau der Materialien verursachten Emissionen etwa in der gleichen Größenordnung wie die durch die Herstellungsprozesse. Allerdings bedarf die Behandlung der Entsorgungsphase in dieser Arbeit weiterer Überlegungen, die über die Größenordnung als alleiniges Kriterium hinausgehen und die fortgeschrittene Entwicklung im Bereich der Abfallwirtschaft berücksichtigen.

Zunächst ist eine Differenzierung zwischen den Umweltbelastungen durch den Rückbau von Kraftwerken, Baustoffen und Heizsystemen vorzunehmen.

Bei Energieträgern wie Heizöl, Erdgas, Fern-/Nahwärme, Strom, etc. kann theoretisch der Rückbau der Kraftwerke in Rechnung gestellt werden. Im konventionellen Kraftwerkbereich sind allerdings nach [Borsch2001] die CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Betriebsphase die dominierenden. Bedenkt man die im Vergleich zur Lebensdauer eines Gebäudes bzw. einer Sanierungsmaßnahme viel größere Nutzungsdauer eines Kraftwerks, dürfte die Umweltbelastung durch den Rückbau vernachlässigbar sein.

Für den Rückbau von Heizungssystemen und Baustoffen sind einige Überlegungen zu aktuellen Entwicklungen anzuführen. Laut einer aktuellen Studie des Instituts der deutschen Wirtschaft in Köln (IW) nimmt die gesamtwirtschaftliche Bedeutung der sog. Sekundärrohstoffe deutlich zu [Bardt2006]. Sekundärrohstoffe werden aus Industrie- und Haushaltsabfällen gewonnen und aufgrund der steigenden Rohstoffpreise zunehmend eingesetzt. Eine Schätzung des Instituts der deutschen Wirtschaft in Köln beziffert die erzielte Wertschöpfung auf 3,7 Mrd. €. Zum Beispiel kann neuer Stahl ohne Qualitätsverlust durch das Einschmelzen und Untermischen alten Stahls erzeugt werden. Ein weiteres Beispiel ist der Aluminium-Einsatz, der für die Herstellung von Fenstern von Bedeutung ist. Rund 95% weniger Energie muß für die Einschmelzung von Aluminium aufgewendet werden als bei der Erzeugung aus dem Rohstoff Bauxit. Die Recyclingrate beträgt ca. 60%. Die Weiterverwertung von Altmaterialien in anderen neuen Verwendungen ist heute ebenfalls möglich. Metallische Sekundärrohstoffe werden hauptsächlich in der Stahlindustrie eingesetzt. Die Recyclingrate in Deutschland betrug in 2004 ca. 44% (zum Vergleich: China 22%,

USA 70% ). Die geringere Rate als in den USA liegt u.a. an der hohen Exportrate Deutschlands. Der Schrott fällt zum Teil im Ausland an.

Desweiteren werden bereits Abfälle als Sekundärrohstoffe, u.a. auch Baustoffe, für die Strom- und Wärmeerzeugung eingesetzt. Was Wärmedämmstoffe angeht, so hängt ihre Behandlung in einem Entsorgungsprozeß maßgeblich von ihrem Heizwert ab. Wärmedämmstoffe mit hohem Heizwert, wie z.B. Polystyrol können in einer Müllverbrennungsanlage (MVA) üblicher Dimensionierung nicht ohne weiteres thermisch entsorgt werden. Diese werden nach Auskunft eines Mitarbeiters der MVA Hamm zunehmend in der Zementindustrie als „Brennstoffe“ eingesetzt, sofern es sich um eine Monocharge handelt. Andere Wärmedämmstoffe oder Bauhilfsstoffe werden gemischt mit Hausmüll verbrannt. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen einer durchschnittlichen MVA, berücksichtigt man die CO<sub>2</sub>-neutrale Verbrennung von Biomasse (über 60% des Siedlungsabfalls), betragen nach [MVAHamm2005] ca. 0,350 tCO<sub>2</sub> pro Tonne Abfall. Eine Umrechnung der verbleibenden Emissionen bei bekannten Bauabfallmengen und Verteilung kann unter Einbeziehung des Heizwertes der Stoffe theoretisch erfolgen. Allerdings ist die Datenbasis bezüglich Zusammensetzung, Aufkommen und Sorten der Bausstoffe nicht ausreichend.

Bedenkt man bei der Bilanzierung einer MVA zusätzlich die Tatsache, daß diese einen Teil der erzeugten Energie in Strom- und Fernwärmenetze einspeisen, führen diese sog. Gutschriften bei der Bilanzierung zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Nach [MVAHamm2005] werden mindestens 60% des erzeugten Stroms zur regionalen Energieversorgung genutzt. Die Müllheizkraftwerke Südhessen, mit Sitz in Darmstadt, gelten längst als „Energieversorger“. Eine im Auftrag des BMU durchgeführten Studie belegt, daß die Abfallwirtschaft im Bereich des Siedlungsabfalles einen Beitrag zum Klimaschutz leistet. So sanken die CO<sub>2</sub>-Emissionen zwischen 1990 und 2001 von 25,5 auf 0,6 Mio. Tonnen. Aufgrund der Abfalllagerungsverordnung, die eine Vorbehandlung des Abfalls vor seiner Lagerung vorschreibt, wurde für das Jahr 2005 sogar eine Entlastung von 4,5 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> prognostiziert (s. Abbildung 4.3) [BMU/IFEU2005].

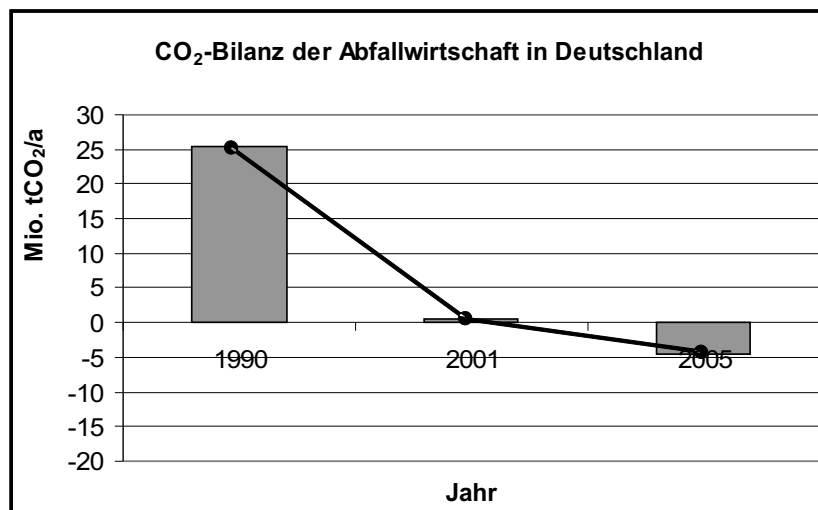


Abbildung 4.3: CO<sub>2</sub>-Bilanz der Abfallwirtschaft [BMU/IFEU2005]

Diese kurze Darstellung einiger Aspekte der Entsorgungsphase verdeutlicht die Komplexität dieses Themengebietes. Erschwert wird eine Analyse durch die unsichere Datenlage, die durch die dynamische Entwicklung der Abfallwirtschaft bedingt ist. Die Schwierigkeiten lassen sich auch nicht durch die Verwendung von GEMIS ausblenden, da dort die Entsorgungsphase nur intransparent abgebildet wird. Damit wird der Aufwand, eine belastbare Datengrundlage zu schaffen, für diese Arbeit zu groß. Dieses Themengebiet mußte deshalb ausgeblendet werden.

### • Lebensdauer der Maßnahmen

Bei den Öko-Bilanzen in diesem Kapitel und der Ermittlung der CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten anhand von Szenarien (Kapitel 5) wurden die Lebensdauer nach Tabelle 4.2 angesetzt.

Tabelle 4.2: Lebensdauer der untersuchten Produkte bzw. Sanierungsobjekte

<i>Produkte bzw. Sanierungsobjekte</i>	<i>Lebensdauer n in Jahren</i>
Außenwand	25
Dach, Decke, Fenster, Keller	20
Heizungsanlagen	20
Wärmepumpen	20
Photovoltaikanlagen	30
Windanlagen	20
Blockheizkraftwerke	20
Bodenheizung (Gitter)	20
Öl- / Brennstofftank	20
Rohrleitungen aus Kupfer/Stahl/Guss	40 bis 50
Elektroinstallation der Heizungsanlage	20

## 4.4 Materialbedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen bei Bauteilsanierungen

### 4.4.1 Untersuchungsrahmen und Vorgehensweise

Es wurden Produkte aus den Kategorien Bauhilfsstoffe (Tabelle 4.3), Fenster (Tabelle 4.4) und Wärme- bzw. Trittschalldämmstoffe (Tabelle 4.5) untersucht.

Tabelle 4.3: Auswahl der Bauhilfsstoffe

<i>Betrachtete Bauhilfsstoffe</i>	
Putze	Kalkzementputz, Kunstharzputz, Zementputz, Wärmedämmputz
Bauplatten, Holzwerkstoffe	Gipskartonplatte, Schnittholz/Brettholz, Schnittholz/Kantholz, Spanplatte
Abdichtungen, Beschichtungen	Bitumenanstrich, PE-Dampfbremse, PE-Dichtungsbahn
Dachbaustoffe	Betondachstein, Bitumendachbahn, Dachziegel, Faserzement-Dachplatte
Massivbaustoffe, Schüttungen	Kies, Zementestrich
Sonstige Bauhilfsstoffe	verzinktes Stahlblech, Glasfasergewebe, Klebmasse

Tabelle 4.4: Auswahl der Fenster

<b>Betrachtete Fenster (Rahmen und Verglasung)</b>	
Rahmen	Verglasungsart bzw. Güte
Holz	Beschichtetes / unbeschichtetes Glas 2- und 3-fache Wärmeschutz-, 3-fache Isoverglasung
Kunststoff	
Aluminium	

Tabelle 4.5: Auswahl der Dämmstoffe und Abkürzungen

<b>Dämmstoffe und ihre Abkürzungen</b>			
Anorganische mineralische Rohstoffe		Organische Rohstoffe	
natürlich	synthetisch	natürlich	synthetisch
expandierte Perlite BLP	Glaswolle GLW Steinwolle STW Schaumglas SGL	Hanf HAN Holzwolleplatten HWL Schilfrohr SRP	Polystyrol-Hartschaum EPS Polyurethan-Hartschaum PUR

Die Vielzahl der untersuchten Stoffe und Materialien macht eine spätere Wirtschaftlichkeitsanalyse der einzelnen Sanierungsalternativen (meist neuer oder ergänzter Schichtaufbau) schwierig. Daher werden später, ausgehend von den einzelnen Baustoffen, Bauhilfsstoffen und deren Vorketten, ganze Baukonstruktionen betrachtet werden, um eine Aussage über die ökologische Gesamteffektivität einer ausgeführten Maßnahme machen zu können. Zu diesem Zweck wurden die Datenblätter entwickelt, die 17 Baukonstruktionen bzw. Bauelemente enthalten, die typische bauliche Sanierungsmaßnahmen darstellen. Die erfaßten Baukonstruktionen mit ihren Bezeichnungen sind Tabelle 4.6 zu entnehmen.

Bei der Wahl der Sanierungsvarianten der jeweiligen Bauteile wird auf übliche bzw. für den Altbau bewährte Lösungen zurückgegriffen, z.B. nach [Böhning2005] / [Schulze2003]. Dabei wird Wert darauf gelegt, daß zum einen mehrere und gängige Lösungen untersucht werden. Zum anderen werden nicht ausschließlich Lösungen untersucht, die für vor 1978 errichtete Gebäude in Frage kommen. Soweit möglich, werden auch Sanierungslösungen für z.B. Flachdächer untersucht, die selten in diesen Baualtersklassen vorkommen. Zwar stellen die vor 1978 errichteten Wohngebäude den Schwerpunkt der Untersuchungen dar, es wird jedoch angestrebt, daß eine spätere Anwendung der Ergebnisse auf andere Bauten, z.B. Bürogebäude, erleichtert wird. Im folgenden wird beispielhaft die Auswahl bei den Wänden gegen Außenluft sowie bei Dächern erläutert.

Bei Außenwänden (AW1 bis AW4) werden die Varianten Außen- und Innendämmung, Hinterlüftung sowie das Anbringen vom Wärmedämmputz untersucht. Die Variante der Innendämmung stellt insbesondere für Altbauten mit alten und denkmalgeschützten Fassaden eine wirkliche Alternative dar. Oft wird ein Wärmedämmputz angebracht, wenn eine Außendämmung aus gestalterischen Gründen nicht in Frage kommt. Die Maßnahme „Hinterlüftete Fassade“ stellt zwar eine arbeits- und kostenintensive, aber wärmeschutztechnisch hervorragende Lösung dar.

Bei Dächern gegen Außenluft (DA1 Bis DA6) werden sowohl Flachdächer als auch geneigte Dächer untersucht. Bei den geneigten Dächern werden unterschiedliche Anbringungsmöglichkeiten der Wärmedämmung betrachtet. Dazu gehört das Anbringen einer Wärmedämmung im Aufsparren- und Zwischensparrenbereich. Oft besteht in den Altbauten eine Zwischensparrendämmung, die hier in DA6 mit einer Untersparrendämmung ergänzt wird, um den Wärmebrückeneffekt zu vermindern.

Um hier gebäudeunabhängig zu bleiben, werden unterschiedliche Ausgangszustände der Sanierungsobjekte definiert. Diese legen auch die energetische Qualität des Sanierungsobjektes vor der Sanierung fest, die anhand des U-Wertes ausgedrückt wird. Informationen zu den untersuchten Sanierungsobjekten, ihrem Ausgangszustand und den eingesetzten Produkten finden sich im Anhang A.

Tabelle 4.6: Überblick über typische Baukonstruktionen bei Sanierungsmaßnahmen

<b><i>Wände gegen Außenluft ohne bestehende Wärmedämmung</i></b>	
AW1	Anbringung von Wärmedämmputz
AW2	Anbringung einer Außenwärmedämmung mit Verputz (WDVS)
AW3	Anbringung einer Außenwärmedämmung und Holzschalung (Hinterlüftung)
AW4	Anbringung einer Innenwärmedämmung mit Verputz (WDVS)
<b><i>Wände gegen Erdreich ohne bestehende Wärmedämmung</i></b>	
KW1	Anbringung einer Perimeterdämmung mit Abdichtung
<b><i>Decke gegen unbeheizte Räume</i></b>	
DE1	Zwischensparrendämmung einer Holzdecke mit Verschalung und Putz auf der beheizten Seite
DE2	Anbringung von Wärmedämmung und Putz auf der Unterseite einer Kellerdecke (unbeheizt)
DE3	Zwischen- und Untersparrendämmung einer Holzdecke mit Verschalung auf beheizter Seite
<b><i>Boden gegen Erdreich</i></b>	
BO1	Verlegung einer Trittschalldämmung auf der Bodenplatte und Estrich
<b><i>Dächer gegen Außenluft</i></b>	
DA1	Flachdach-Duodach: Verlegung einer Wärmedämmung und Abdichtung
DA2	Umkehrdach: Verlegung einer Wärmedämmung und Abdeckung mit Kies
DA3	Aufsparrendämmung mit Wiederverwendung der Dacheindeckung
DA4	Zwischensparrendämmung und Verschalung auf der Innenseite
DA5	Zwischen- und Untersparrendämmung mit innenseitiger Verschalung
DA6	Anbringung einer Untersparrendämmung an bestehende Zwischensparrendämmung mit innenseitiger Verschalung
<b><i>Fenster</i></b>	
GLA	Konstruktion von unterschiedlichen Verglasungsarten
FEN	Kombination der Verglasungsarten mit verschiedenen Rahmenmaterialien

Die Ergebnisse der Untersuchungen wurden zu Datenblättern ökologischer Kennwerte von baulichen Maßnahmen aufbereitet. Die Datenblätter dienen der Strukturierung, der Veranschaulichung der Konstruktion vor und nach der Sanierungsmaßnahme, der Erfassung von ökologischen Kennwerten sowie ihrer graphischen Darstellung und sind Anhang C zu entnehmen. Dort findet sich auch eine genaue Beschreibung des Aufbaus der Datenblätter. Pro Sanierungsobjekt (Außenwand, Dach, Fenster etc.) wird ein Datenblatt zugewiesen, das mehrere Kombinationen der eingesetzten Materialien und Bauelemente berücksichtigt.

Die Öko-Bilanzen der einzelnen Sanierungsstoffe und -produkte dürfen nicht als einzige zur Bewertung einer gesamten Sanierungsmaßnahme herangezogen werden. Auch damit verbundene Zusatzmaterialien sowie die verwendeten Mengen spielen eine Rolle. Daher werden Bauteilsanierungen auf der Grundlage der Datenblätter im Gesamtkontext untersucht und bewertet. Unter dem dazu herangezogenen „Öko-Vergleich“ ist ein Vergleich auf der Basis von ökologischen Kennwerten zu verstehen. Diese sind in dieser Arbeit die Wirkungskategorien CO<sub>2</sub> und KEA. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, daß Untersuchungen an der Technischen Universität Darmstadt zur Gewinnung von Wärmedämmstoffen aus Hausmüll hier keine Berücksichtigung fanden, da sie noch nicht in einem ausreichenden Maße Einzug in die industrielle Produktion gefunden haben. Sobald dies geschieht, ist mit einer Verbesserung der Werte anorganischer Dämmstoffe zu rechnen.

#### 4.4.2 Wandsanierungen

Die Ergebnisse für die untersuchten Varianten der Wandsanierungen sind in Tabelle 4.7 zusammengestellt. Die Dämmdicke und die Wärmeleitgruppe (WL<sub>G</sub>) werden variiert. Das Symbol „d“ gibt die gesamte Dicke der sanierten Konstruktion in Metern an.

Tabelle 4.7: Wandsanierungen im Öko-Vergleich

Sanierungs- maßnahme	d [m]	CO <sub>2</sub> -Äquivalent [kg/m <sup>2</sup> ]			KEA <sub>ne</sub> [kWh/m <sup>2</sup> ]			KEA <sub>st</sub> [kWh/m <sup>2</sup> ]			U <sub>alt</sub>	U <sub>neu</sub> [W/(m <sup>2</sup> K)]	U <sub>alt</sub>	U <sub>neu</sub> [W/(m <sup>2</sup> K)]	U <sub>alt</sub>	U <sub>neu</sub> [W/(m <sup>2</sup> K)]															
AW1 - Wärmedämmputz																															
WL <sub>G</sub> 060		WDP			WDP			WDP			HLZ d = 24 cm		VZ d = 24 cm		VZ d = 30 cm																
	0,02			4,97			4,49			0,06	0,66			1,18		1,08															
	0,03			7,46			6,73			0,09	0,61	0,80		1,03		0,95															
	0,04			9,94			8,98			0,13	0,55		1,73	0,88	1,52	0,82															
	0,05			12,43			11,22			0,16	0,50			0,77		0,72															
AW2 - Wärmedämmverbundsystem (WDVS)																															
WL <sub>G</sub> 040		EPS			HAN			STW			EPS		HAN			STW		EPS		HAN			STW			HLZ d = 24 cm		VZ d = 24 cm		VZ d = 30 cm	
	0,08	15,13	12,38	23,25	7,09	6,72	35,04	0,29	0,33	0,68	0,80		0,29			0,37		0,36													
	0,10	16,29	12,85	26,44	7,75	7,28	42,69	0,31	0,35	0,79		0,26		1,73	0,31	1,52	0,30														
	0,12	17,45	13,32	29,63	8,41	7,85	50,33	0,32	0,38	0,90		0,23			0,27		0,26														
	0,14	18,61	13,80	32,82	9,07	8,42	57,98	0,34	0,40	1,01		0,20			0,24		0,23														
AW3 - hinterlüftete Fassade																															
WL <sub>G</sub> 040		EPS			STW			GLW			EPS		STW			GLW			HLZ d = 24 cm		VZ d = 24 cm		VZ d = 30 cm								
	0,08	10,35	8,59	9,18	9,63	12,62	12,53	14,70	14,72	15,00	0,80		0,30			0,37		0,36													
	0,10	11,54	9,34	10,08	10,45	14,19	14,07	15,09	15,13	15,47		0,26		1,73	0,32	1,52	0,31														
	0,12	12,73	10,09	10,98	11,26	15,75	15,61	15,49	15,53	15,94		0,23			0,27		0,27														
	0,14	13,92	10,84	11,88	12,07	17,31	17,14	15,89	15,93	16,41		0,21			0,24		0,24														
AW4 - Wärmedämmverbundsystem (WDVS)																															
WL <sub>G</sub> 040		EPS			HAN			STW			EPS		HAN			STW			HLZ d = 24 cm		VZ d = 24 cm		VZ d = 30 cm								
	0,08	15,13	12,38	23,25	7,09	6,72	35,04	0,29	0,33	0,68	0,80		0,31			0,39		0,38													
	0,10	16,29	12,85	26,44	7,75	7,28	42,69	0,31	0,35	0,79		0,27		1,73	0,32	1,52	0,32														
	0,12	17,45	13,32	29,63	8,41	7,85	50,33	0,32	0,38	0,90		0,23			0,28		0,27														
	0,14	18,61	13,80	32,82	9,07	8,42	57,98	0,34	0,40	1,01		0,21			0,25		0,24														
KW1 - Perimeterdämmung																															
WL <sub>G</sub> 040		EPS			SGL			PUR			EPS		SGL			PUR			HLZ d = 24 cm		VZ d = 24 cm		VZ d = 30 cm								
	0,08	10,86	23,51	32,81	3,41	24,81	34,81	0,12	1,13	0,83	0,84		0,32			0,40		0,39													
	0,10	12,79	28,61	40,23	4,51	31,27	43,76	0,14	1,41	1,03		0,27		1,96	0,34	1,69	0,33														
	0,12	14,73	33,70	47,65	5,61	37,72	52,71	0,17	1,69	1,23		0,24			0,29		0,28														
	0,14	16,66	38,80	55,07	6,71	44,17	61,66	0,19	1,97	1,43		0,21			0,25		0,25														

Variante AW1 erscheint umweltfreundlicher als andere Maßnahmen wegen der vergleichsweise geringen Emissionen bei der Herstellung des Wärmedämmputzes. Allerdings wird auch bei einer Dicke von 5 cm die EnEV-Anforderung an bestehende Wohngebäude ( $U_{\max} = 0,35 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ) immer noch nicht erfüllt.

Beim Vergleich von AW2 mit AW3 fällt auf, daß die Maßnahme „Hinterlüftete Fassade“ ökologisch günstiger ist. Die verwendeten Dämmstoffe besitzen die gleiche Wärmeleitfähigkeit, weisen aber unterschiedliche Rohdichten auf. Aufgrund der unterschiedlichen Belastungen werden für AW2 und AW3 unterschiedliche Steinwolle-Qualitäten verwendet, die sich (u.a.) in den Rohdichten unterscheiden. Deshalb wurden für AW2 149 und für AW3 30 kg/m<sup>3</sup> angesetzt. Für EPS wurde in beiden Konstruktionen 18 kg/m<sup>3</sup> angenommen: Mit ein Grund, warum Steinwolle bei AW3 wider Erwarten besser als EPS abschneidet.

#### 4.4.3 Decken- und Bodensanierungen

Die Ergebnisse der Öko-Bilanzen für Decken- und Dachsanierung finden sich in Tabelle 4.8. Betrachtet man die Emissionen für Glaswolle (GLW), so sind sie nie die niedrigsten und ggf. die höchsten. Der Einsatz von GLW für diese Maßnahmen ist deshalb ökologisch eher ungünstig.

Tabelle 4.8: Decken- und Bodensanierungen im Öko-Vergleich

Sanierungs- maßnahme	d [m]	CO <sub>2</sub> -Äquivalent [kg/m <sup>2</sup> ]			KEA <sub>ne</sub> [kWh/m <sup>2</sup> ]			KEA <sub>o</sub> [kWh/m <sup>2</sup> ]			U <sub>alt</sub>	U <sub>neu</sub> [W/(m <sup>2</sup> K)]	U <sub>alt</sub>	U <sub>neu</sub> [W/(m <sup>2</sup> K)]	U <sub>alt</sub>	U <sub>neu</sub> [W/(m <sup>2</sup> K)]
DE1 - Zwischensparrendämmung																
WLG*		EPS	GLW	SRP	EPS	GLW	SRP	EPS	GLW	SRP		EPS 040		GLW 040		SRP 045
Keller	0,15	13,63	11,30	9,81	10,63	16,38	15,57	9,06	9,65	9,61	1,31 1,46	0,25 0,26	1,31 1,46	0,25 0,26	1,31 1,46	0,27 0,28
Dach																
DE2 - Kellerdecke																
WLG*		GLW	STW	HWL	GLW	STW	HWL	GLW	STW	HWL		GLW 040		STW 040		HWL 040
	0,08	15,14	11,48	15,65	23,03	20,21	8,28	1,44	0,32	0,44	1,05	0,34 0,29 0,25 0,22	1,05	0,34 0,29 0,25 0,22	1,05	0,54 0,48 0,43 0,40
	0,10	17,88	13,30	18,51	28,09	24,58	9,66	1,79	0,38	0,53						
	0,12	20,61	15,12	21,37	33,16	28,94	11,04	2,13	0,44	0,62						
	0,14	23,34	16,94	24,23	38,22	33,30	12,42	2,48	0,51	0,72						
DE3 - Innensanierung Decke																
WLG 040		GLW	STW	EPS	GLW	STW	EPS	GLW	STW	EPS		Keller		Dach		
	0,08	21,47	16,93	20,85	33,43	31,03	13,08	3,33	1,75	1,56	1,31	0,19 0,18 0,17 0,17	1,46	0,19 0,18 0,18 0,17		
	0,10	24,10	18,72	22,74	38,22	35,18	14,23	3,85	2,01	1,78						
	0,12	26,72	20,50	24,62	43,02	39,32	15,38	4,37	2,27	2,01						
	0,14	29,35	22,29	26,51	47,82	43,47	16,52	4,89	2,54	2,24						
BO1 - Innensanierung Boden																
WLG*		GLW	STW	EPS	GLW	STW	EPS	GLW	STW	EPS		GLW 035		STW 036		EPS 044
	0,08	29,88	26,22	21,78	34,67	31,85	16,02	1,71	0,59	0,37	3,69	0,22 0,19 0,17 0,16	3,69	0,22 0,20 0,18 0,16	3,69	0,24 0,22 0,20 0,18
	0,10	32,61	28,04	22,49	39,73	36,22	16,42	2,06	0,65	0,38						
	0,12	35,35	29,86	23,20	44,80	40,58	16,82	2,40	0,71	0,39						
	0,14	38,08	31,68	23,91	49,87	44,94	17,23	2,74	0,78	0,40						
* unterschiedliche Wärmeleitergruppen																

\* unterschiedliche Wärmeleitgruppen

Bei der Sanierungsvariante DE2 überraschen die praktisch gleichen CO<sub>2</sub>-Äquivalente für Glaswolle (GLW) und Holzwolle-Leichtbauplatten (HWL). Betrachtet man 1 kg Dämmstoff, erhält man die Werte 2,04 kgCO<sub>2</sub>/kg für GLW und 0,31 kgCO<sub>2</sub>/kg für HWL. Die geringere Rohdichte von GLW wirkt hier ausgleichend. Ökologisch sind die HWL daher günstiger wegen der geringeren KEA-Werte. Man beachte, daß die vergleichsweise hohe Wärmeleitfähigkeit der HWL dazu führt, daß der von der EnEV geforderte U-Wert von 0,40 W/(m<sup>2</sup>K) erst bei einer Dämmstärke von 14 cm erreicht wird.

#### 4.4.4 Dachsanierungen

Der Tabelle 4.9 ist zu entnehmen, daß die Dachsanierungen DA4 - DA6 mit Einsatz der Zelluloseplatten als Dämmstoff die ökologisch sinnvollsten sind. Dies liegt hauptsächlich daran, daß etwa die Hälfte der nötigen Prozeßenergie aus nachwachsenden Rohstoffen zur Verfügung gestellt wird. Der maximal zulässige U-Wert für Flach- und Steildächer beträgt gemäß EnEV 0,25 W/(m<sup>2</sup>K) bzw. 0,30 W/(m<sup>2</sup>K). Um diese Anforderung zu erfüllen, ist beim Einsatz von Blähperlit aufgrund der größeren Wärmeleitfähigkeit mindestens eine Dämmstoffstärke von 12 cm erforderlich. Trotzdem bleiben die Emissionen von Blähperlit unter denen von PUR-Hartschaum und Schaumglas beim Einbau von 8 cm dicken Platten. Die Steildachsanierungen DA3 – DA6 erfüllen die EnEV-Anforderungen (0,3 W/(m<sup>2</sup>K)).

Tabelle 4.9: Dachsanierungen im Öko-Vergleich

Sanierungs- maßnahme	d [m]	CO <sub>2</sub> -Äquivalent [kg/m <sup>2</sup> ]			KEA <sub>ne</sub> [kWh/m <sup>2</sup> ]			KEA <sub>a</sub> [kWh/m <sup>2</sup> ]			U <sub>alt</sub>	U <sub>neu</sub> [W/(m <sup>2</sup> K)]	U <sub>alt</sub>	U <sub>neu</sub> [W/(m <sup>2</sup> K)]	U <sub>alt</sub>	U <sub>neu</sub> [W/(m <sup>2</sup> K)]
DA1 - Flachdach / Duodach																
WLK*		SGL	PUR	BLP	SGL	PUR	BLP	SGL	PUR	BLP		SGL 040		PUR 040		BLP 050
	0,08	28,98	38,28	18,95	31,23	41,22	14,94	1,24	0,93	0,24		0,25		0,25		0,28
	0,12	39,18	53,12	24,13	44,13	59,12	19,70	1,80	1,34	0,30		0,20		0,20		0,23
	0,16	49,37	67,96	29,31	57,04	77,02	24,46	2,36	1,74	0,36	1,31	0,17	1,31	0,17	1,31	0,19
	0,20	59,56	82,81	34,49	69,94	94,92	29,22	2,92	2,15	0,42		0,14		0,14		0,17
DA2 - Umkehrdach / Plusdach																
WLK 040		SGL	PUR	EPS	SGL	PUR	EPS	SGL	PUR	EPS						
	0,08	21,85	31,14	9,20	27,02	37,01	5,61	1,23	0,92	0,21		0,36				
	0,12	32,04	45,99	13,06	39,92	54,91	7,81	1,79	1,33	0,26	1,31	0,27				
	0,16	42,23	60,83	16,93	52,82	72,81	10,01	2,35	1,73	0,31		0,21				
	0,20	52,42	75,67	20,80	65,73	90,71	12,21	2,91	2,14	0,36		0,17				
DA3 - Aufsparrendämmung																
WLK 040		PUR	SGL	GLW	PUR	SGL	GLW	PUR	SGL	GLW						
BDS	0,16	71,11	54,38	23,56	81,41	63,42	27,86	19,38	19,93	18,66						
DAZ	0,16	81,08	64,34	33,52	85,62	67,63	32,07	19,61	20,17	18,89	3,70	0,27				
FZD	0,16	86,52	69,79	38,97	94,84	76,85	41,29	19,81	20,37	19,09						
DA4 - Zwischensparrendämmung																
WLK 040		ZEL	SGL	GLW	ZEL	SGL	GLW	ZEL	SGL	GLW						
	0,16	13,25	42,15	11,34	13,05	50,49	14,93	11,82	2,56	1,29	3,70	0,27				
DA5 - Zwischen- und Untersparrendämmung																
WLK 040		ZEL	SGL	GLW	ZEL	SGL	GLW	ZEL	SGL	GLW						
	0,08	17,67	61,35	21,84	18,20	74,77	34,11	18,41	4,41	3,37		0,19				
	0,10	18,78	66,14	24,46	19,48	80,84	38,91	20,05	4,87	3,89	3,70	0,17				
	0,12	19,88	70,94	27,09	20,77	86,91	43,70	21,70	5,33	4,41		0,16				
	0,14	20,99	75,74	29,71	22,06	92,98	48,50	23,34	5,79	4,94		0,15				
DA6 - Untersparrendämmung																
WLK 040		ZEL	SGL	GLW	ZEL	SGL	GLW	ZEL	SGL	GLW						
	0,08	9,91	24,36	15,85	9,22	27,94	22,95	7,21	2,57	2,81		0,22				
	0,10	11,02	29,08	18,45	10,51	33,91	27,68	8,87	3,08	3,37	0,63	0,20				
	0,16	14,35	43,25	26,24	14,40	51,84	41,86	13,87	4,60	5,07		0,16				
	0,20	16,57	52,70	31,44	16,99	63,78	51,32	17,20	5,62	6,20		0,15				
* unterschiedliche Wärmeleitergruppen																

\* unterschiedliche Wärmeleitgruppen

#### 4.4.5 Fenstermodernisierung

Bei der Öko-Bilanz von Fenstern wurden die Verglasungsarten 1-fache Verglasung (VGL), 3-fache Isolierverglasung (ISG), 2-fache und 3-fache Wärmeschutzverglasung (WSG) untersucht. Kombiniert mit Rahmen aus den Werkstoffen Holz, Aluminium und Kunststoff sind die Öko-Bilanzergebnisse in Tabelle 4.10 angegeben. Es ist zu beachten, daß die Ausgangszustände im unsanierten Zustand unterschiedlich angenommen wurden.



Tabelle 4.10: Fenstermodernisierung im Öko-Vergleich

Sanierungs- maßnahme	d [m]	CO <sub>2</sub> -Äquivalent [kg/m <sup>2</sup> ]			KEA <sub>ne</sub> [kWh/m <sup>2</sup> ]			KEA <sub>alt</sub> [kWh/m <sup>2</sup> ]			U <sub>alt</sub>	U <sub>neu</sub> [W/(m <sup>2</sup> K)]	U <sub>alt</sub>	U <sub>neu</sub> [W/(m <sup>2</sup> K)]	U <sub>alt</sub>	U <sub>neu</sub> [W/(m <sup>2</sup> K)]			
GLA - Verglasung																			
1VGL	0,006	15,99			17,03			0,25				5,80							
3/SG	0,028	33,18			36,45			0,52				2,00							
2WSG	0,024	22,98			26,18			0,47				1,00							
3WSG	0,028	34,22			38,49			0,71				0,50							
FEN - Fenster																			
Fensterrahmen		HOL			ALU			PVC			HOL			ALU			PVC		
1VGL	0,006	42,86	99,23	60,94	62,43	137,40	91,71	6,83	5,04	1,87		-							
3/SG	0,028	60,05	116,42	78,12	81,85	156,81	111,13	7,10	5,31	2,14	2,80	1,93	4,38	1,93	2,97	1,93	1,35		
2WSG	0,024	49,85	106,22	67,92	71,58	146,54	100,86	7,05	5,26	2,09		1,35		1,35		1,35			
3WSG	0,028	61,09	117,46	79,16	83,89	158,86	113,17	7,28	5,50	2,32		1,07		1,07		1,07			

Da eine 3-fache Wärmeschutzverglasung im Vergleich zur 3-fachen Isolierverglasung bei ungefähr gleichen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten einen wesentlich niedrigeren U-Wert erreicht (0,5 statt 2,0 W/m<sup>2</sup>K), ist die 3-fache Isolierverglasung auch aus wärmeschutztechnischen Gründen nicht zu empfehlen. Kombiniert mit einem Holz-, Alu- oder PVC-Rahmen führt die 3-fache Wärmeschutzverglasung zu den ökologisch günstigeren Ergebnissen. Man beachte, daß man mit modernen Rahmen für alle Materialien die gleichen U-Werte erreichen kann, jedoch haben die Holzrahmenfenster die niedrigsten Vorketten.

#### 4.4.6 Fazit

Die Vielfalt der Einsatzmaterialien, der objektorientierten Sanierungsalternativen (Wände werden anders als Decken, Außen- anders als Innenbauteile saniert usw.), der unterschiedlichen damit verbundenen Zusatzarbeiten oder -materialien und der bereits erwähnten Rolle der benötigten Menge läßt keinen allgemein gültigen Trend ausmachen. Eine Bewertung der Maßnahmen nach Kategorien wie ökologisch „vertretbar“ oder „nicht vertretbar“ läßt sich erst vornehmen, wenn eine Gegenüberstellung der durch die Maßnahme erzielten CO<sub>2</sub>-Einsparungen und die verursachten Emissionen aus den Vorketten stattfindet (s. Kapitel 5). Einige Beobachtungen lassen sich jedoch festhalten.

Bauhilfsstoffe fehlen praktisch bei keiner baulichen Maßnahme. Sind diese auf der Basis oder unter der Verwendung von Zement (z.B. Putz, Estrich) hergestellt worden, verursacht die energie- und emissionsintensive Zementherstellung auch bei ihnen ungünstige Bilanzergebnisse. Auch sollten günstige Öko-Bilanzen nicht voreilig beurteilt werden. Hier gilt es, auch andere Aspekte im Auge zu behalten. Diese können z.B. besondere Materialeigenschaften sowie das Verhalten bezüglich des Feuchte- und Wärmeschutzes sein. Beim Einsatz von EPS sollte z.B. bedacht werden, daß dieser verfällt, bei der Holzwohle, daß ein Ungezieferproblem droht und bei Wärmedämmputz, daß je nach Ausgangszustand des Sanierungsobjektes erst größere Dicken den gewünschten Wärmeschutzstandard (z.B. auf der Basis von EnEV) bringen. Die heutige Industrie von Bau- und Sanierungsmaterialien greift bei den Herstellprozessen kaum auf erneuerbare Ressourcen zurück. Wäre dies der Fall, könnten die Öko-Bilanzen beispielsweise auch von Glaswolle, Steinwolle und Polyurethan-Hartschaum (PUR) allgemein günstiger ausfallen.

## 4.5 Material- und betriebsbedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen bei apparativen Maßnahmen

### 4.5.1 Untersuchungsrahmen und Vorgehensweise

Unter apparativen Sanierungsmaßnahmen werden die Modernisierungen der Heizungsanlage, der Umstieg auf effizientere Brennstoffe und/oder Brenntechnologie sowie der Umstieg auf eine Energieversorgung auf regenerativer Basis verstanden.

Bei der Öko-Bilanz wird nach dem Prozeßergebnis Wärme und Strom unterschieden. Als Anlagen zur Wärmebereitstellung wurden Heizungsanlagen mit fossilen oder regenerativen Energieträgern, wärmeorientierte Öl- und Erdgas-Blockheizkraftwerke sowie Wärmepumpen untersucht. Als Anlagen zur Stromerzeugung wurden Wind- und Photovoltaikanlagen sowie stromorientierte Blockheizkraftwerke betrachtet. Desweiteren werden fossile und regenerative Brennstoffe (Öl, Erdgas, Flüssiggas, Biomasse) sowie unterschiedliche Stromarten (Normalstrom, Energiemix, Ökostrom) bilanziert. Tabelle 4.11 gibt eine Übersicht der hier untersuchten Anlagen und Energieträger wieder.

Tabelle 4.11: Betrachtete Anlagen und Energieträger

<i>Betrachtete Anlagen und Energieträger</i>			
	<i>Anlagen zur Wärmebereitstellung</i>	<i>Anlagen zur Stromerzeugung</i>	<i>Energieträger</i>
<i>Fossil</i>	Kohle-Heizung	Öl-Blockheizkraftwerk	Normalstrom
	Öl-Heizung	Erdgas-Blockheizkraftwerk	Strom aus Steinkohle
	Erdgas-Heizung		Strom aus Uran und Kohle
	Flüssiggas-Heizung		Heizöl
	Öl-Blockheizkraftwerk		Erdgas
	Erdgas-Blockheizkraftwerk		
	Strom-Heizung <sup>5</sup>		
<i>Regenerativ</i>	Wärmepumpen	Windanlage (klein, mittel, groß)	Ökostrom
	Hackschnitzel-Heizung	Photovoltaikanlage (mono, amorph, poly)	Hackschnitzel
	Pellets-Heizung		Pellets
	Stückholz-Heizung		Stückholz

Gebäudeunabhängige Aussagen gestalten sich bei der Untersuchung von Heizungsanlagen im Rahmen von apparativen Sanierungsmaßnahmen schwieriger als bei den baulichen Maßnahmen. Die Gebäudegröße, die damit verbundene Haushaltsgröße und der Bedarf an Energie bestimmen die Anlagengröße bzw. die Anlagenleistung. Diese sind wiederum wichtig bei der Herstellung der Anlagen. Um diese Problematik zu lösen, werden die Wirkungskategorien der Öko-Bilanz auf 1 kW Anlagenleistung bzw. 1 kWh erzeugte Raumwärme bezogen. In den Berechnungen des Kapitels 5 werden unterschiedliche Anlagenleistungen definiert und diese entsprechend bei der Berechnung integriert, so daß zum Schluß gebäudeunabhängige Aussagen möglich werden.

### 4.5.2 Heizungsverteilungssysteme

Beim Austausch der Heizungsanlagentechnik wird das Rohrleitungssystem als noch intakt vorausgesetzt. Die Erneuerung des Rohrleitungssystems wird i.d.R. durch andere Zwänge als durch Energiesparen allein bewirkt und wird daher hier nicht systematisch analysiert. Dagegen können

<sup>5</sup>betrieben mit Strom auf der Basis fossiler Energieträger

Die Öko-Bilanzergebnisse ergeben sich zu 51,05 kgCO<sub>2</sub>/kW für Heizkörper und 8,32 kgCO<sub>2</sub>/kW für Fußbodenheizungsgitter. Die große Differenz liegt zwar auch am unterschiedlich hohen Stoffaufwand im Herstellungsprozeß begründet. Ausschlaggebend ist jedoch die Tatsache, daß bei der Herstellung von Stahlblech für Heizkörper der benötigte Energieaufwand zu 75% aus „deutschen“ Ressourcen gedeckt wird, während man Granulat für Fußbodenheizungsgitter aus dem Ausland importiert. Aufgrund der Systemgrenze wird das Fußbodenheizungsgitter begünstigt. Global betrachtet, würde ein dreifach höherer Energieaufwand für die Herstellung der benötigten Menge an Granulat anfallen als für die Herstellung des Stahlblechs. Desweiteren wird bei der Herstellung des Granulats die aus dem Ausgangsstoff Ethylen erzeugte Prozeßwärme als Gutschrift verbucht.

Die Öko-Bilanzen wurden für die o.g. Anlagen untersucht und dabei sowohl alte als auch neue Technologien sowie Niedertemperatur- und Brennwerttechnologien berücksichtigt. Mit aufgeführt in Tabelle 4.12 werden eventuell notwendige Heizkörper oder Fußbodenheizung. Die Herstellungs- und Betriebsphase werden getrennt betrachtet.

Tabelle 4.12: Öko-Bilanz der Anlagen zur Wärmebereitstellung (Herstellung und Betrieb)

[illegible]

Folgende Beobachtungen konnten gemacht werden.

- Bei der Herstellung sind Elektro-Heizungen und Erdgas-BHKW's bezüglich den Emissionen vergleichbar. Sie verursachen höhere Emissionen als die konventionellen Heizungen und Heizungen auf der Basis von Biomasse.
- Bei Wärmepumpen mit gerammter Sonde ist der Ausstoß sehr hoch. Dies hat einbautechnische Gründe. Die Sonde wird mit Hilfe eines Gussrohrs in die Erde eingerammt, das eingesetzt wird und als „verlorene Schalung“ in der Erde bleibt.
- Die Elektro-Heizungen weisen die höchsten betrieblichen Emissionen auf.
- Heizungsanlagen, die mit Biomasse beschickt oder mit Ökostrom betrieben werden, sind, wie erwartet, im Betrieb emissionsarm.
- Der Umstieg von Niedertemperatur- auf die Brennwerttechnologie bringt nur eine geringe Umweltentlastung.
- Der ungünstige Strom-Mix aus nichterneuerbaren Energieträgern begründet zum größten Teil den deutlichen Unterschied zwischen Wärmepumpen auf der Basis von Normal- und Öko-Strom in der Betriebsphase.
- Es fallen negative Werte auf, die auf die Gutschriften zurückzuführen sind.
  - Große Teile des Energieaufwands in der Betriebsphase der BHKW's werden durch das Koppelprodukt Strom kompensiert.
  - Bei der Herstellung der Fußbodenheizung wird Prozeßwärme auch durch den Ausgangsstoff Ethylen erzeugt.

#### 4.5.4 Anlagen zur Stromerzeugung

Bei den Öko-Bilanzen von Anlagen zur Stromerzeugung wurden die Aufwendungen bis zur Systemgrenze „Gebäudekante“ berücksichtigt. Bei Windanlagen (WEA) wurden verschiedene Parkgrößen (klein, mittel, groß), bei Photovoltaikanlagen (PVA) unterschiedliche Solarzellen (amorph, kristallin, mono) betrachtet. Die technischen Daten sind Anhang E zu entnehmen.

Es werden stromorientierte BHKW's untersucht und das Koppelprodukt Wärme als „Gutschrift“ bei der Modellierung verbucht.

Tabelle 4.13 gibt die Ergebnisse für die Herstellungs- und Betriebsphase getrennt wieder. Auch hier werden Emissionen der Bereitstellung der Brennstoffe in der Betriebsphase nicht gesondert aufgewiesen. Für die Herstellungsphase werden die Emissionen und der Energieaufwand pro 1 kW Anlagenleistung, für die Betriebsphase pro 1 kWh erzeugtem Strom angegeben.

Tabelle 4.13: Öko-Bilanz der Anlagen zur Stromerzeugung (Herstellung und Betrieb)

Anlagentechnik	Herstellung		Betrieb	
	CO <sub>2</sub> -Äquivalent [kgCO <sub>2</sub> /kW]	KEA [kWh/kW]	CO <sub>2</sub> -Äquivalent [kgCO <sub>2</sub> /kWh <sub>Strom</sub> ]	KEA [kWh/kWh <sub>Strom</sub> ]
Öl-BHKW	233,50	277,16	0,30	0,04
Gas-BHKW	123,82	159,57	0,21	0,17
WEA klein	657,34	796,02	0,00	1,00
WEA mittel	743,37	872,26	0,00	1,00
WEA groß	912,48	1.091,13	0,00	1,00
PVA amorph	3.294,68	6.738,67	0,00	1,00
PVA mono	4.236,66	8.721,33	0,00	1,00
PVA poly	3.969,58	7.956,85	0,00	1,00

Die Zahl 1,0 für den KEA-Wert von WEA's und PVA's ist auf die Überlegung zurückzuführen, daß die Verluste bei der Umwandlung einer Inputmenge Wind- bzw. Sonnenenergie in 1 kWh Strom als Output ökologisch keine Rolle spielen. Wind- und Sonnenenergie werden dabei als unbegrenzt verfügbar angesehen.

Während Strom aus Wind und Photovoltaik im Betrieb emissionsfrei ist, konnten folgende Beobachtungen gemacht werden.

- Die BHKW's liefern die günstigsten Ergebnisse.
- Ein Öl-BHKW weist einen kleineren thermischen Wirkungsgrad als ein Gas-BHKW auf. Daraus resultiert ein geringerer Wärme-Bonus im Vergleich zu einem Gas-BHKW. Diese geringere Wärme-„Gutschrift“ geht in die Öko-Bilanz mit ein und begründet zum größten Teil die höheren Emissionen eines Öl-BHKW. Zum anderen liegen diese auch an den höheren Emissionen bei der Verbrennung von Öl im Vergleich zu Erdgas.
- Die Herstellung der Wind- und Photovoltaikanlagen ist energieintensiv und verursacht einen hohen Ausstoß. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, daß die Rechen-programme aktuelle Entwicklungen der Herstellungsprozesse nicht berücksichtigen. Gegenwärtig werden Photovoltaik-„Rollen“ auf der Basis von weichem Kunststoff hergestellt und dabei auf den Aluminiumrahmen verzichtet. Dadurch werden Energieaufwand und damit verbundene CO<sub>2</sub>-Emissionen reduziert. Diese Variante wird zumindest für Pilotprojekte angewendet.

#### 4.5.5 Bereitstellung von Energieträgern

Es wurden Brennstoffe aus fossilen und regenerativen Ressourcen, unterschiedliche Stromarten sowie (zum Vergleich) Strom aus Kohle und Atomkraft untersucht (Tabelle 4.14).

Berücksichtigt werden Aufwendungen bis zur „Gebäudekante“ sowie infrastrukturelle Aufwendungen wie Pipelines für den Erdgastransport. Die Brennstoffe Heizöl, Flüssiggas, Hackschnitzel, Holzpellets und Steinkohle-Briketts wurden mit einem Transportmedium kombiniert. Die Ergebnisse sind Tabelle 4.15 zu entnehmen.

Tabelle 4.14: Zusammensetzung der Ressourcen für verschiedene Stromarten

Normalstrom	Ökostrom	Strom aus Kohle	Strom aus Uran und Kohle
30% Kernenergie 27% Braunkohle 22% Steinkohle 8% Erdgas 10% Reg. Energien 3% Heizöl und sonstige	76% Wasserkraft 14% Biomasse 5% Windenergie 5% Solarenergie	100 % Kohle	85 % Kohle 15 % Atomkraft

Tabelle 4.15: Öko-Bilanz der Brennstoffe und Strom

Energieträger		Angaben pro 1 kWh Elektrizität oder 1 kWh Heizwert			
		CO <sub>2</sub> -Äquivalent [kgCO <sub>2</sub> /kWh]	KEA [kWh/kWh]	KEA <sub>ne</sub> [%]	KEA <sub>e</sub> [%]
<b>Fossil</b>	Strom (Steinkohle)	1,09	2,82	99,98	0,02
	Strom (Uran+Kohle)	0,93	2,40	99,97	0,03
	Normalstrom	0,64	1,66	88,51	11,49
	Erdgas	0,02	0,19	99,93	0,07
	Flüssiggas	0,02	0,04	99,63	0,37
	Heizöl	0,02	0,04	99,63	0,37
	Steinkohle-Brikett	0,06	1,05	99,95	0,05
<b>Regenerativ</b>	Ökostrom	0,04	1,56	2,60	97,40
	Hackschnitzel	0,01	1,02	0,88	99,12
	Pellets	0,02	1,03	2,01	97,99
	Stückholz	0,00	1,00	0,06	99,94

Um den gleichen Heizwert von Gas oder Öl zu erhalten, muß bei den anderen Energieträgern eine vielfache Menge an Energie aufgewendet werden. Bei Strom aus Kohle-Kraftwerken und Atomkraft äußert sich dies in den hohen Emissionen. Der Normalstrom weicht geringfügig davon ab, da bei Bauvorleistungen und Transport ca. 12% erneuerbare Ressourcen eingesetzt werden. Bei den regenerativen Brennstoffen und dem Öko-Strom wird die vielfach höhere Energiemenge praktisch ausschließlich aus regenerativen Quellen gewonnen. Die Emissionen bleiben aufgrund von Bauvorleistungen und Transporten jedoch meist größer als null.

#### 4.5.6 Fazit

Die Öko-Bilanzen der apparativen Sanierungsmaßnahmen belegen, daß eine regenerative Energieversorgungstechnik zwar in der Betriebsphase geringe bis gar keine Emissionen emittiert, daß aber die Herstellung der dazu nötigen Anlagen ggf. energie- und emissionsintensiv ist. Zu erwähnen sind hier insbesondere Wind-, Photovoltaikanlagen und Wärmepumpen. Die günstige Öko-Bilanz von BHKW zeigt, daß eine umweltfreundliche Energieversorgungstechnik in der Herstellung und im Betrieb keine Frage des Umstiegs auf regenerative Energien ist, sondern auch der fortschrittlichen Brenntechnik und der effizienten Brennstoffe. Bei Stromheizungen führen die Stromleitungsverluste sowie, ausgenommen Öko-Strom und z.T. Normalstrom, die energieaufwendige Gewinnung und Erzeugung auf Basis fossiler Energiequellen zusätzlich zu

hohen Emissionen. Hohe Emissionen werden auch bei der Herstellung der Elektrospeicherheizungen erzeugt, da Zement, das Speichermedium, in der Herstellung mit großem Energieaufwand verbunden ist. Auch nutzen Anlagenhersteller bei den Herstellungsprozessen kaum regenerative Energien.

Nach diesen Erkenntnissen gilt es nun zu prüfen, welche baulichen und apparativen Sanierungsmaßnahmen ökologisch sinnvoll sind. Diese Bewertung bedingt eine Gegenüberstellung der Vorketten und der erzielten CO<sub>2</sub>-Einsparungen unter Berücksichtigung der betrieblichen Emissionen, die nur am konkreten Fall vorgenommen werden kann.

## 5 CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten von Sanierungsmaßnahmen

### 5.1 Allgemeines

In diesem Kapitel werden energetische Sanierungsmaßnahmen im Altbaubestand hinsichtlich ihrer ökologischen Effektivität und Effizienz geprüft. Dabei findet eine Bilanzierung zwischen der direkt erzielten CO<sub>2</sub>-Einsparung (am/im Gebäude) und den Vorketten statt. Das Verhältnis zwischen den Investitionskosten der Maßnahme und der effektiven CO<sub>2</sub>-Minderung, im weiteren spezifische CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten genannt, liefert eine Aussage über die Kosten/Nutzen-Relation einer Maßnahme, wobei hier keine weiteren internen oder externen Effekte berücksichtigt werden.

Zur Erinnerung: Unter *CO<sub>2</sub>-Einsparung* wird die Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen verstanden, die unmittelbar am bzw. im Gebäude durch Sanierungsmaßnahmen erzielt wird. Werden die Vorketten von dieser CO<sub>2</sub>-Einsparung abgezogen, ergibt sich die (effektive) Reduzierung, im weiteren *CO<sub>2</sub>-Minderung* genannt.

Es werden bauliche und apparative Sanierungsmaßnahmen betrachtet. Bauliche Sanierungsmaßnahmen bedeuten die Verbesserung des Wärmeschutzes der Gebäudehülle; apparative zielen auf einen Wechsel hin zu effizienterer Technik und Energieträgern sowie auf den Umstieg auf regenerative Energien.

### 5.2 Ökologische und ökonomische Bewertung einer Maßnahme

Ein wichtiges, wenn auch nicht das einzige Kriterium für Entscheidungsprozesse, ist die ökonomische Effizienz der jeweiligen Handlungsoption. Das gilt sowohl für einzelwirtschaftliche als auch für politische Entscheidungsfindungen.

Im Bereich der Umweltpolitik hat man es mit einer schwierigen Fragestellung zu tun. Zum einen will man energie- bzw. umweltpolitische Ziele erreichen, zum anderen ist die Bereitschaft der Gesellschaft und der Industrie, diese Ziele auch materiell zu unterstützen, nicht gerade groß. Der Emissionshandel für den industriellen Verursachersektor soll dem entgegenwirken und eine (politisch gewollte) wirtschaftliche Motivation bringen, einen Beitrag zur Senkung der klimaschädlichen Gase zu leisten. Dabei spielen für die Handelspartner die sog. *CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten* (s. Abschnitt 5.3) eine wichtige Rolle.

Im Verursachersektor private Haushalte gibt es dazu noch kein Pendant. Oft sind die Sanierungsmaßnahmen an sich für den Eigentümer wirtschaftlich nicht interessant genug. Sie werden daher gefördert. Eine ganzheitliche Betrachtung wird jedoch kaum vorgenommen. Es erscheint daher legitim, Fragen zu stellen:

Ließen sich die CO<sub>2</sub>-Minderungsziele in den privaten Haushalten nicht wesentlich kostengünstiger erfüllen, wenn man nur ökologisch sinnvolle Maßnahmen fördern würde? Ließen sich diese Ziele gar noch leichter erreichen, wenn man auch noch die legitimen Wirtschaftlichkeitsgedanken des Eigentümers bedenken und diese als Instrument nutzen würde?

Um diese Fragen zu beantworten, werden in diesem Kapitel als erster Schritt Sanierungsmaßnahmen unterschiedlicher Art im Hinblick auf ihre ökologische Effektivität und ökonomische Effizienz untersucht. Die ganzheitliche Betrachtung von Aufwand (Investieren) und Gewinn (Emissionsminderung) wird dabei gewahrt. Dazu ist die Berücksichtigung der Vorketten der eingesetzten Produkte und Anlagen notwendig. Mögliche Erlöse z.B. aus Energieeinsparung oder Mietseinnahmen werden zunächst außer Acht gelassen.



Die *ökologische Effektivität* einer Sanierungsmaßnahme in Bezug auf ihr Emissionsminderungspotential gilt in dieser Arbeit als gegeben, wenn durch die Maßnahme eine effektive CO<sub>2</sub>-Minderung möglich ist. Durch eine Gegenüberstellung der durch eine Maßnahme direkt erzielten CO<sub>2</sub>-Einsparung und der dafür angefallenen Vorketten wird die (effektive) Emissionsminderung ermittelt. Durch die Überprüfung der *wirtschaftlichen Effizienz* einer Maßnahme wird die Frage beantwortet:

*„Wieviel muß bei bestimmten Gegebenheiten im Rahmen einer Maßnahme monetär investiert werden, um effektiv 1 kg an CO<sub>2</sub>-Emissionen zu mindern?“.*

In diesem Kapitel werden die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten für verschiedene Szenarien ermittelt. Der Zinssatz und die Laufzeit des Kredits werden variiert. Dies soll unabhängig von der Tatsache geschehen, ob der Eigentümer noch einspart oder nicht bzw. ob die Lebensdauer einer Maßnahme abgelaufen ist oder nicht.

Tabelle 5.1 enthält die Angaben der Szenarien, dargestellt an einem Faktor  $f_{z,t}$ , mit dem die ermittelten CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten multipliziert werden können. Dieser hängt vom Zinssatz und von der Laufzeit des Kredits ab und wird wie folgt berechnet.

$$(5.1) \quad f_{z,t} = (1+z)^t$$

mit

z      Zinssatz in %/100

t      Laufzeit des Kredits in Jahren.

Tabelle 5.1: Faktor  $f_{z,t}$  je Zinssatz und Laufzeit

<i>Faktor <math>f_{\text{Zinssatz}; \text{Laufzeit}}</math></i>	<i>Wert</i>
$f_{4;20}$	2,19
$f_{5;10}$	1,63
$f_{5;15}$	2,08
$f_{5;20}$	2,65
$f_{6;10}$	1,79
$f_{6;15}$	2,40
$f_{6;20}$	3,21

## 5.3 Ermittlung der CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten

### 5.3.1 Begriff der CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten

In der Regel werden Emissionsminderungen durch Änderungen in den technischen Systemen erzielt. Diese Änderungen sind mit Kosten verbunden. Gleichzeitig können aber andere Nutzeffekte entstehen. In diesem Kontext werden unterschiedliche Begriffe für Kosten definiert. Nach [Kasz1997] sind folgende Definitionen bekannt:

- Unter „CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten“ wird die Gesamtheit aller Kosten verstanden, die mit einer bestimmten Option der Emissionsminderung einhergehen.

- „Spezifische Investitionskosten zur Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen“ sind diejenigen Investitionskosten, die mit einer bestimmten Option der Emissionsminderung notwendig werden.
- „Volkswirtschaftliche Zusatzkosten“ sind alle volkswirtschaftlichen Kosten- und Nutzeneffekte unter Beachtung externer Effekte.
- „Betriebswirtschaftliche Zusatzkosten“ sind Kosten aus einer betriebswirtschaftlichen Investitionsrechnung unter Einfluß aller internen Kosten- und Nutzeneffekte.

Während die „spezifischen Investitionskosten zur Vermeidung von CO<sub>2</sub>“ und die „CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten“ ausschließlich die Kostenseite berücksichtigen, fließen in die volks- und betriebswirtschaftlichen Zusatzkosten auch die Nutzeneffekte ein. Die Kosten einer energetischen Sanierungsmaßnahme zur Emissionsminderung sind nach [Kasz1997] als „spezifische Investitionskosten zur Vermeidung von CO<sub>2</sub>“ zu bezeichnen. Weil keine Verwechslung auftreten kann, wird in dieser Arbeit dafür die griffigere Bezeichnung spezifische *CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten* verwendet.

### 5.3.2 Mathematischer Ansatz

Die Emissionsminderung im Gebäudebereich kann u.a. durch Maßnahmen und Änderungen an der Gebäudehülle und/oder Heiztechnik erfolgen. Es gilt allerdings zu unterscheiden: Bei einer baulichen Sanierungsmaßnahme wird der Wärmeschutz der Gebäudehülle verbessert. Der Heizwärmebedarf wird gesenkt. Bei einer apparativen Sanierungsmaßnahme bleibt der Heizwärmebedarf gleich, dagegen kann die Erzeugung des Heizenergiebedarfs effizienter oder/und emissionsärmer werden. Die Verluste der Erzeugung und Verteilung und die betrieblichen Emissionen können reduziert werden. Es ist zu beachten, daß solange die Bewohner eines Gebäudes vor und nach der baulichen Maßnahme die gleichen sind, die Unterscheidung zwischen Bedarf und Verbrauch bei der Ermittlung der Einsparungen keine Rolle spielt. Es geht bei beiden Ansätzen lediglich um die Differenz an Heizwärme, die durch eine Sanierungsmaßnahme weniger ge- oder verbraucht wird.

Die spezifischen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten einer Sanierungsmaßnahme werden nach folgendem Ansatz berechnet, wobei bei der Ermittlung des Terms  $CO_{2,E}$  zwischen baulichen und apparativen Maßnahmen zu unterscheiden ist (siehe (5.3) bzw. (5.4)).

$$(5.2) \quad VK_{CO_2} = \frac{I}{CO_{2,E} - CO_{2,V}} \quad \text{bei } CO_{2,E} \neq CO_{2,V}$$

mit

$VK_{CO_2}$	Spezifische CO <sub>2</sub> -Vermeidungskosten in €/kgCO <sub>2</sub>
$I$	Investitionskosten in €, ermittelt nach Anhang F und Anhang G
$CO_{2,E}$	direkt erzielte CO <sub>2</sub> -Einsparungen über die Lebensdauer in kgCO <sub>2</sub>
$CO_{2,V}$	Vorketten der eingesetzten Materialien und Anlagen in kgCO <sub>2</sub> .

Für die Untersuchungen wurde als Bilanzzeitraum die Lebensdauer der Maßnahme gewählt. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen sind direkt an den Energieverbrauch eines Gebäudes gekoppelt. Die Umrechnung der Energie in CO<sub>2</sub>-Äquivalente erfolgt über einen heizungssystemspezifischen Konversionsfaktor

$\kappa$ : Dieser beschreibt in kgCO<sub>2</sub>/kWh die Menge der CO<sub>2</sub>-Emissionen, die pro erzeugte kWh Raumwärme ausgestoßen wird.

Die Berechnung der direkt erzielbaren CO<sub>2</sub>-Einsparungen bei baulichen und apparativen Maßnahmen erfolgt nach (5.3) bzw. (5.4).

$$(5.3) \quad CO_{2,E} = n \Delta Q \kappa_{alt} \varphi_{alt} \quad \text{bei baulichen Maßnahmen}$$

$$(5.4) \quad CO_{2,E} = n Q (\kappa_{neu} \varphi_{neu} - \kappa_{alt} \varphi_{alt}) \quad \text{bei apparativen Maßnahmen}$$

mit

$CO_{2,E}$  direkte CO<sub>2</sub>-Einsparungen in kgCO<sub>2</sub>

$n$  Lebensdauer der Maßnahme in Jahren  $a$

$\Delta Q$  jährliche Heizwärmeeinsparung in kWh/a

$Q$  Jahresheizwärmeverbrauch in kWh/a

$\kappa_{neu}$  Konversionsfaktor des neuen Heizsystems in kgCO<sub>2</sub>/kWh

$\kappa_{alt}$  Konversionsfaktor des alten Heizsystems in kgCO<sub>2</sub>/kWh

$\varphi_{neu}$  Verlustfaktor des neuen Heizsystems

$\varphi_{alt}$  Verlustfaktor des alten Heizsystems. 1,0 bei Stromheizungen, ansonsten 1,15.

### 5.3.3 Interpretation der CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten

Die ermittelten spezifischen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten in €/kgCO<sub>2</sub> liefern die Antwort auf die Frage

*„Wieviel muß bei bestimmten Gegebenheiten im Rahmen einer Maßnahme monetär investiert werden, um effektiv 1 kg an CO<sub>2</sub>-Emissionen zu mindern?“.*

Dabei werden Aufwand und Gewinn ins Verhältnis gestellt. Der Aufwand sind hier die erforderlichen Investitionskosten, der Gewinn die effektiv geminderten Emissionen. Die Gegebenheiten betreffen die Art der energetischen Sanierungsmaßnahme, die energetische Qualität der Sanierungsobjekte und die Auswahlvarianten der Sanierungsmöglichkeiten.

Bei positiven Vermeidungskosten (VK<sub>CO<sub>2</sub></sub>) liegt prinzipiell eine effektive CO<sub>2</sub>-Minderung vor. Sie sind ein Hinweis auf ökologisch effektive Maßnahmen. Negative VK<sub>CO<sub>2</sub></sub> deuten auf ökologisch nicht effektive Maßnahmen hin und bedeuten, daß die sog. Vorketten der gewählten Maßnahme höher sind als die direkten CO<sub>2</sub>-Einsparungen und während des gesamten Bilanzzeitraums der Maßnahme nicht kompensiert werden. Maßnahmen mit negativen VK<sub>CO<sub>2</sub></sub> sind deshalb aus ökologischer Sicht nicht zu empfehlen. Eine Aussage über die wirtschaftliche Effizienz ist somit nur bei positiven VK<sub>CO<sub>2</sub></sub> sinnvoll. Kleine positive Werte sind ein Hinweis auf besonders effiziente Maßnahmen. Je größer diese sind, desto weniger effizient ist eine Maßnahme.

In Gleichung (5.2) steht auf der rechten Seite im Nenner eine Differenz, die ggf. Null werden kann (*singuläre* Stellen). In diesem Fall sind die Vorketten einer Maßnahme und die erzielten Einsparungen exakt gleich. Dies trat bei den in dieser Arbeit untersuchten Fällen nicht auf.

Um Verwechslungen der in diesem Kapitel besprochenen *spezifischen* Vermeidungskosten und der im folgenden Kapitel 6 verwendeten *effektiven* Vermeidungskosten zu vermeiden, sei hier kurz auf

die jeweilige Vorzeichenkonvention eingegangen. Wie bereits erläutert, sind negative *spezifische* Vermeidungskosten ein Indikator für ökologisch nicht effektive Maßnahmen und führen zu einer ungünstigen Bewertung. In Kapitel 6 werden nur ökologisch effektive Maßnahmen betrachtet, also Maßnahmen mit  $CO_{2,V} > CO_{2,E}$ . Per Konstruktion ist deshalb der Nenner der Formel (6.3) für *effektive* Vermeidungskosten positiv. Für die Bewertung von *effektiven* Vermeidungskosten ist deshalb das Vorzeichen des Zählers ausschlaggebend. In den Zähler gehen die Investitionskosten mit positivem und die Erlöse mit negativem Vorzeichen ein. Überwiegen die Erlöse die Investitionskosten, sind die *effektiven* Vermeidungskosten negativ. Negative *effektive* Vermeidungskosten sind deshalb günstig zu bewerten, denn sie sind Gewinne.

### 5.3.4 Berücksichtigung der Vorketten

Die im Kapitel 4 ermittelten material- und betriebsbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen bilden, unter Berücksichtigung der festgelegten Systemgrenzen eine breite und detaillierte Datenbasis für weiterführende Untersuchungen. Insbesondere die Dokumentation der Ergebnisse für bauliche Sanierungskonstruktionen in den Datenblättern ist bisher in der Form nicht erfolgt. Aus diesem Grund können die Ergebnisse nur bedingt mit bestehenden Untersuchungen wie z.B. [EyeRein2000] verglichen werden.

Die ermittelten Werte der betriebsbedingten Emissionen bei apparativen Maßnahmen (Anlagen und Brennstoffe) weisen Abweichungen auf zu den Werten aus dem CO<sub>2</sub>-Gebäudesanierungsprogramm der KfW in [KfW2006]. Tabelle 5.2 enthält eine Gegenüberstellung ausgesuchter Heizsysteme.

Tabelle 5.2: CO<sub>2</sub>-Äquivalente einiger Heizsysteme – Ein Vergleich

<i>Spalte 1</i>	<i>Spalte 2</i>	<i>Spalte 3</i>
<i>Heizsystem</i>	<i>KfW (f)</i> <i>kgCO<sub>2</sub>/kWh<sub>RW bzw. Strom</sub></i> <i>(Betrieb) n. [KfW2006]</i>	<i>Eigene Werte (κ)</i> <i>kgCO<sub>2</sub>/kWh<sub>RW bzw. Strom</sub></i> <i>(Betrieb/Energieträger)</i>
Elektro Speicherheizung	<b>1,08</b>	- / <b>1,15</b>
Kohle Festbrennstoffkessel	0,74	0,68 / 0,06
Heizöl Standardkessel vor 1995	<b>0,56</b>	<b>0,47 / 0,02</b>
Heizöl Niedertemperatur alt	0,49	0,42 / 0,02
Heizöl Niedertemperatur ab 1995	0,40	0,33 / 0,02
Heizöl Brennwertkessel ab 1995	0,37	0,31 / 0,02
Erdgas Standardkessel vor 1995	<b>0,45</b>	<b>0,34 / 0,02</b>
Erdgas Niedertemperatur alt	0,40	0,31 / 0,02
Erdgas Niedertemperatur ab 1995	0,32	0,24 / 0,02
Erdgas Brennwertkessel ab 1995	0,30	0,22 / 0,02
Fernwärme fossil	<b>0,00 bis 0,28</b>	<b>0,23<sup>6</sup></b>
BHKW Öl/Gas	-	<b>0,02-0,17 / 0,02</b>
Biomasse (Hackschnitzel/Pellets)	<b>0,05</b>	<b>0,03-0,04 / 0,01-0,02</b>

<sup>6</sup> Auf der Grundlage von unterschiedlichen Energiemixen

In Anbetracht der Tatsache, daß keine genaueren Informationen zu den Rahmenbedingungen existieren, unter denen die KfW-Werte zustande kommen, können für die Abweichungen nur folgende Gründe genannt werden.

- Nach Information eines IWU-Mitarbeiters berücksichtigen die Berechnungen der KfW-Werte nur teilweise einen pauschalisierten Herstellungsaufwand.
- Die eigenen Werte wurden mit der aktuellsten Version Gemis 4.3 ermittelt.
- Die geographische Systemgrenze bei den eigenen Werten wurde in der Grenze Deutschlands festgelegt.

Die Abweichungen sind allerdings für die wichtigsten und gängigsten Heizsysteme in einem Bereich, in dem man auch die Fehlertoleranzen vermuten muß, und damit nicht signifikant. Für die im Kapitel 6 untersuchten Altbauten sind vor allem die vor 1995 eingebauten Standard Öl- und Erdgasheizungen interessant. Für diese betragen die Abweichungen 12 bzw. 17%. Aus Gründen der Vergleichbarkeit mit anderen Studien werden deshalb im folgenden für apparative Maßnahmen die betrieblichen CO<sub>2</sub>-Äquivalente der KfW verwendet.

## 5.4 CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten baulicher Sanierungsmaßnahmen

Bei der Ermittlung der CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten werden die Investitionskosten zu 100% auf *energetische* Sanierungsmaßnahmen angerechnet. Werden Maßnahmen durch Instandsetzung oder Feuchteschäden erforderlich, kann es zu Verschiebungen der Ergebnisse kommen.

Neben Fenstermodernisierung wurden verschiedene Sanierungsvarianten von Wänden gegen Außenluft, Wänden gegen Erdreich, Decken gegen unbeheizte Räume, Boden gegen Erdreich sowie Dächer gegen Außenluft untersucht (s. Tabelle 4.6 sowie Anhang A). Die ermittelten CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten werden hier exemplarisch erläutert. Dabei handelt es sich um eine ungedämmte Außenwand aus Hochlochziegel (HLZ) der Dicke 24 cm und der Bauzeit zwischen 1930 und 1965. Der Einfluß des Dämmmaterials, der Dämmstärke, der Vorketten und der bestehenden Heizungstechnik wird dabei diskutiert. Die Vermeidungskosten (X-Achse) werden in Abhängigkeit von der bestehenden Anlagentechnik (Y-Achse) abgetragen. Die Anlagentechnik umfaßt alte und neue Anlagen, konventionelle und regenerative Systeme. Es werden die Maßnahmen Außen- und Innenwärmedämmung mit Wärmedämmverbundsystem (WDVS), Hinterlüftete Fassade, jeweils mit Steinwolle als Dämmstoff sowie die Maßnahme Wärmedämmputz auf Basis von Polystyrol-Hartschaum (EPS) betrachtet.

### 5.4.1 Vergleich der einzelnen Maßnahmen

In Abbildung 5.1 ist der Verlauf der spezifischen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten der einzelnen Maßnahmen vergleichbar. Sie bewegen sich dabei um die 0,5 €/kgCO<sub>2</sub>, oft auch darunter.

Abweichend davon fallen insbesondere zwei Werte auf. Die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten bei Holzheizungen weichen von den restlichen Werten stark ab und weisen höhere Werte bis 3,7 €/kgCO<sub>2</sub> auf. Dies liegt am Einfluß der Anlagentechnik (s. Abschnitt 5.4.2).

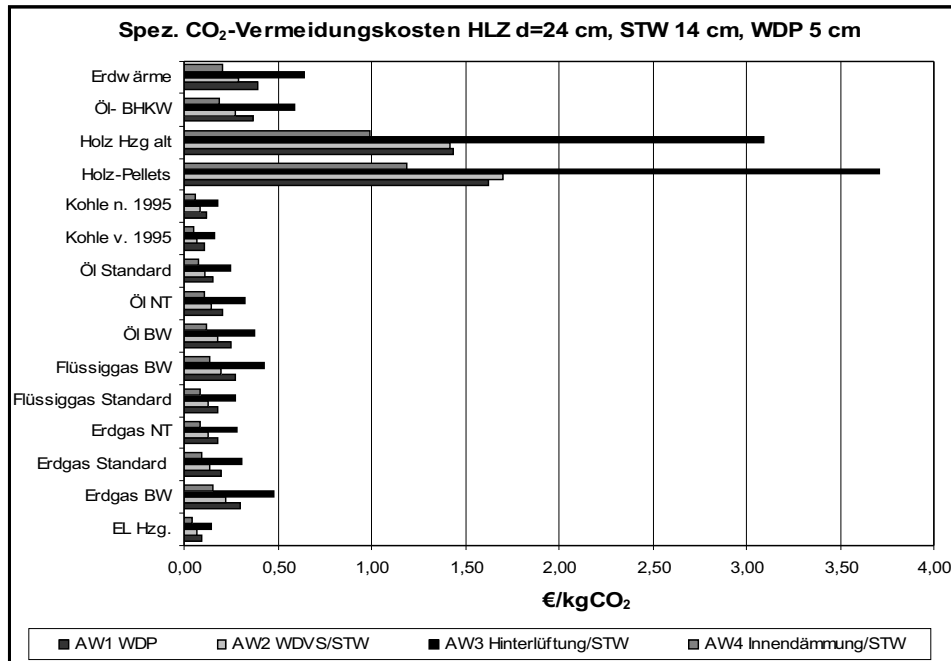


Abbildung 5.1: Spez. CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten einer HLZ-Außenwand (Erläuterungen: s. Anhang A)

Betrachtet man die vier durchgeführten Maßnahmen, sind die höchsten CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten bei der Maßnahme „Hinterlüftete Fassade“ und die niedrigsten bei der Variante Wärmedämmputz auszumachen. Die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten der Maßnahmen Wärmedämmputz und Außendämmung mittels WDVS unterscheiden sich kaum. Beim Vergleich der Außen- und Innendämmung mit WDVS ist zu beachten, daß die Vorketten die gleichen sind. Auch die energetische Verbesserung ist vergleichbar. Der Einfluß der Investitionskosten führt jedoch zu unterschiedlichen Ergebnissen. Diese sind bei einer Innendämmung niedriger, da z.B. das Aufstellen eines Gerüsts entfällt.

Obwohl der Wärmedämmputz (AW1) die geringsten Vorketten bei Wandsanierungen generiert und daher bei dieser Maßnahme im Verhältnis eine hohe effektive CO<sub>2</sub>-Minderung zu erwarten wäre, weist er gleiche CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten wie eine Außendämmung mittels WDVS auf. Der vergleichbare Kostenaufwand für das Anbringen von Außenputz mit dem Kostenaufwand einer Außendämmung mit WDVS (den höchsten Anteil machen die Arbeitslohnkosten und das Aufstellen des Gerüsts aus) kompensiert den Einfluß der Vorketten. Die höchsten CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten weist die Maßnahme „Hinterlüftete Fassade“ aufgrund der höheren Investitionskosten auf.

#### 5.4.2 Einfluß der bestehenden Anlagentechnik

Betrachtet man zunächst den Einfluß der Investitionskosten nicht, führen hohe effektive CO<sub>2</sub>-Minderungen zu niedrigen spezifischen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten (s. Formel 5.2).

Bei einer (hier baulichen) Sanierung wird der Heizwärmebedarf reduziert. Ist die bestehende Anlagentechnik stark emittierend, ist deshalb auch mit höheren Emissionsminderungen als bei Anlagen zu rechnen, die im Betrieb einen geringeren Ausstoß verursachen. Deshalb ist allgemein zu beobachten, daß bauliche Maßnahmen bei moderneren und damit effizienteren und umweltfreundlicheren Anlagen höhere spezifische CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten aufweisen.

Abbildung 5.2 stellt für die Maßnahme WDVS/Steinwolles die spezifischen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten, die CO<sub>2</sub>-Einsparungen, die Vorketten sowie die CO<sub>2</sub>-Minderungen dar.

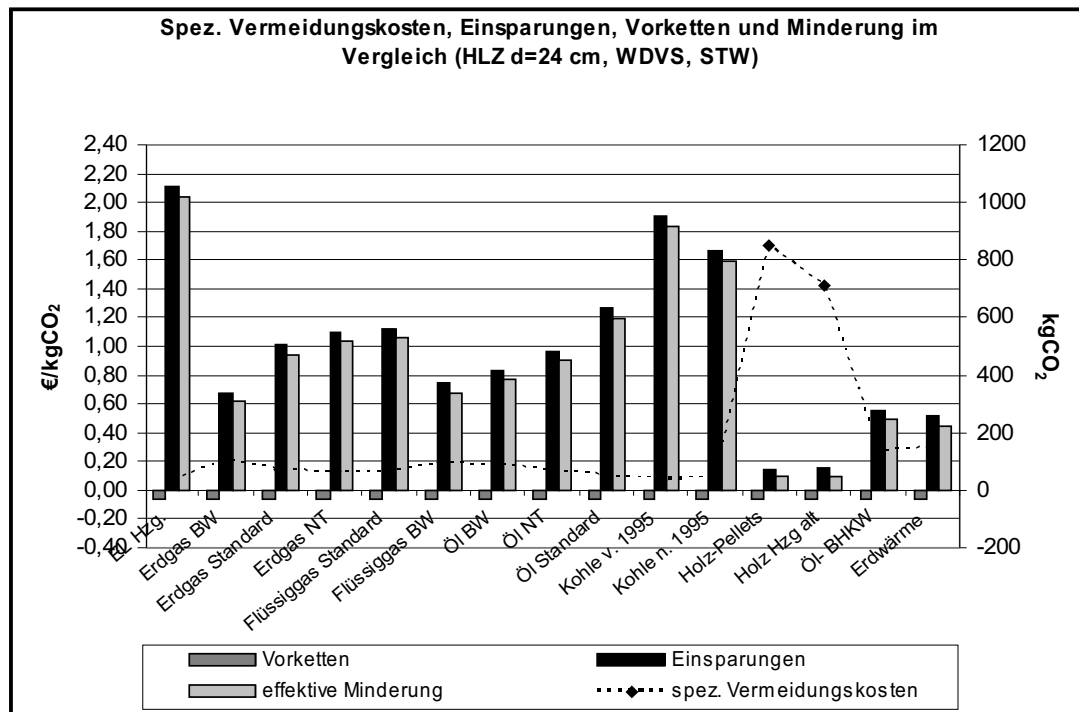


Abbildung 5.2: Spez. CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten, Einsparungen, Vorketten und Minderungen im Vergleich (HLZ d=24 cm, WDVS, STW)

Während die Vorketten konstant sind, weil es sich hier um eine bestimmte Maßnahme handelt, sind die direkt erzielten Einsparungen (am Gebäude) variabel. Diese sind bei einer Holzheizung minimal aufgrund des klimatechnisch nahezu emissionsfreien Betriebs. Dies führt damit zu hohen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten. Nur zum Vergleich ist die Elektroheizung mitbetrachtet worden. Da diese meist mit Normalstrom oder gar Kohlestrom betrieben wird, wird hier ein sehr hoher Ausstoß registriert. Dies führt dazu, daß sich praktisch jede bauliche Maßnahme lohnt und geringe spezifische CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten aufweist.

Der dargelegte Einfluß der Anlagentechnik auf die spezifischen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten läßt eine Schlußfolgerung zu. Es ist i.d.R. ökologisch sinnvoll, eine apparative Sanierung *nach* einer baulichen durchzuführen.

### 5.4.3 Einfluß der Vorketten der jeweiligen Maßnahme

Die Berücksichtigung der Vorketten führt zu „verminderten“ Einsparungen bei der Berechnung der spezifischen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten. Diese werden dadurch höher (Abbildung 5.2). Die untersuchten baulichen Sanierungsmaßnahmen am Hochlochziegel-mauerwerk HLZ der Dicke 24 cm generieren positive spezifische CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten. Das bedeutet, daß eine effektive Emissionsminderung erzielt werden kann. Die durch die Maßnahme eingesparten Emissionen können die angefallenen Vorketten der Maßnahme über die Lebensdauer wieder kompensieren, so daß die Maßnahme als ökologisch sinnvoll angesehen werden kann.

Je nach Ausgangslage und bestehender Technik können die Vorketten auch zu negativen spezifischen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten führen. Damit ist die entsprechende Maßnahme ökologisch nicht sinnvoll. Im folgenden wird die Sanierung des geneigten Daches betrachtet, um diesen Effekt zu verdeutlichen.

In Abbildung 5.3 werden die Maßnahmen Aufsparrendämmung, Untersparren- und Zwischensparrendämmung sowie Untersparrendämmung an einer bestehenden Zwischensparrendämmung (s. Anhang A) unter Einsatz von Schaumglas als Dämmstoff untersucht. Die Dämmstärke orientierte sich zum Teil an der Untersparrenhöhe.

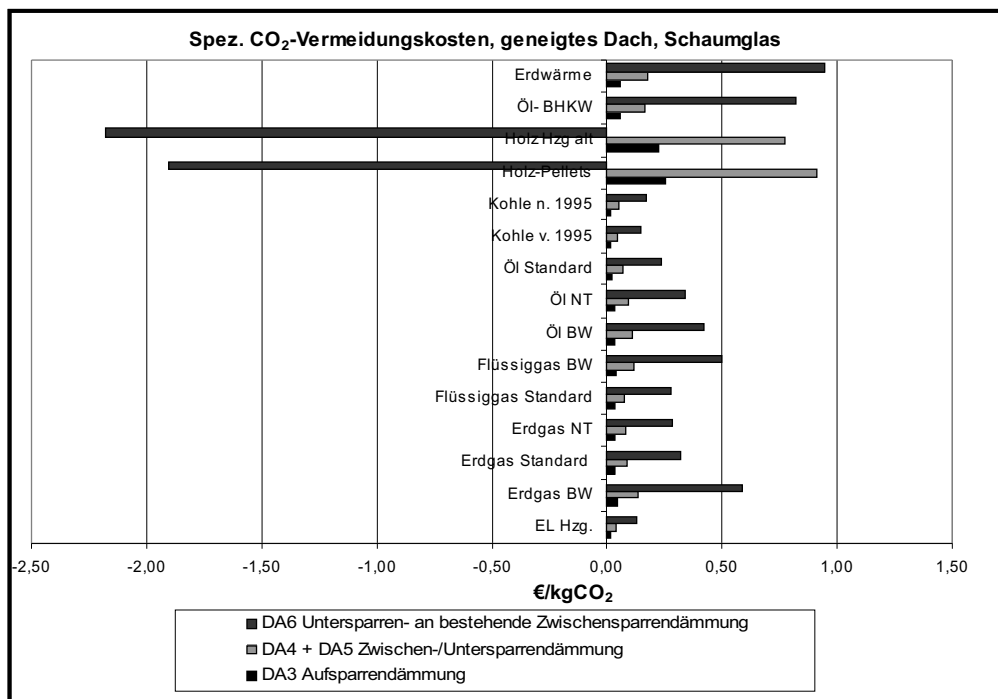


Abbildung 5.3: Spez. CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten von Dämmmaßnahmen am geneigten Dach (Erläuterungen: s. Anhang A)

Die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten der dargestellten Maßnahmen verlaufen bei den konventionellen Heizsystemen ähnlich. Bei der Maßnahme DA6 liegt im Ausgangszustand ein U-Wert von 0,63 W/(m<sup>2</sup>K), bei DA3, DA4 und DA5 dagegen 3,70 W/(m<sup>2</sup>K) vor. Das begründet die niedrigeren Einsparungen und die dadurch tendenziell höheren CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten der Maßnahme DA6.

Daß die Maßnahme DA6 bei bestehenden Holzheizungen negative Vermeidungskosten generiert, liegt daran, daß Holzheizungen im Betrieb niedrigere Emissionen aufweisen als die restlichen Anlagen. Deshalb kommt es dazu, daß die Vorketten die ohnehin niedrigeren Einsparungen überwiegen und negative CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten entstehen.



#### 5.4.4 Einfluß der Dämmstärke

Abbildung 5.4 stellt die spezifischen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten der betrachteten Wand bei Außendämmung mit Steinwolle als Dämmstoff und der Dämmstärken 8, 10, 12, 14 cm dar.

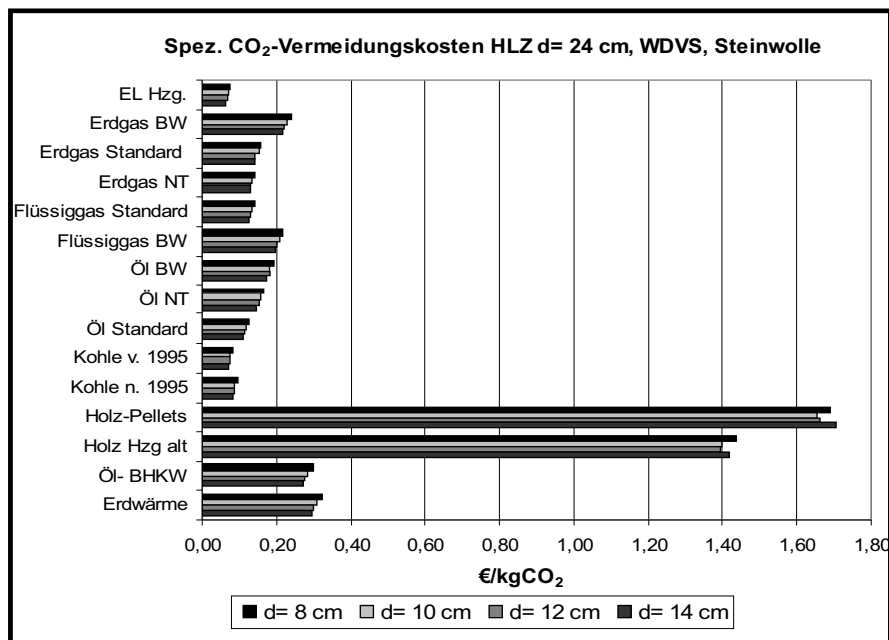


Abbildung 5.4: Spez. CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten in Abhängigkeit der Dämmstärke, am Beispiel einer HLZ-Außenwand der Dicke 24 cm

Die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten sinken bei konventionellen Systemen mit zunehmender Dämmstärke. Grund ist die geringe Zunahme der Investitionskosten im Vergleich zur erzielten Emissionsminderung. Allerdings nehmen die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten ab einer bestimmten Dicke wieder zu. Das bedeutet, daß es ein „Optimum“ gibt, das sich durch maximale Emissionsminderungen und im Verhältnis dazu minimalen Investitionskosten und damit CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten kennzeichnet. Dieses Optimum ist (bei den gewählten Dämmstärken) bei den Holzheizungen früher zu sehen. Dies liegt daran, daß bei bereits emissionsarmer Anlagentechnik eine größere Dämmdicke früher weniger effizient wird und die höheren Investitionskosten nicht kompensiert. Allgemein bleibt der Einfluß der Dämmstärke auf die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten gering.

#### 5.4.5 Übersicht

Abbildung 5.5 faßt die durchschnittlichen spezifischen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten aller betrachteten Sanierungsmaßnahmen, gemittelt über Dämmstoffe und Dämmstärken, zusammen.

Folgende Beobachtungen konnten gemacht werden.

- Bei Außenwandsanierungen generieren die Vollziegelwände (VZ) bei Gebäuden von vor 1930, die geringsten CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten gefolgt von Wänden aus Hochlochziegelmauerwerk (HLZ) (Baujahr ab 1960).
- Auch bei Dach- oder Kellerwandsanierung werden bei Gebäuden von vor 1930 geringere Vermeidungskosten als bei Gebäuden von nach 1960 verursacht.

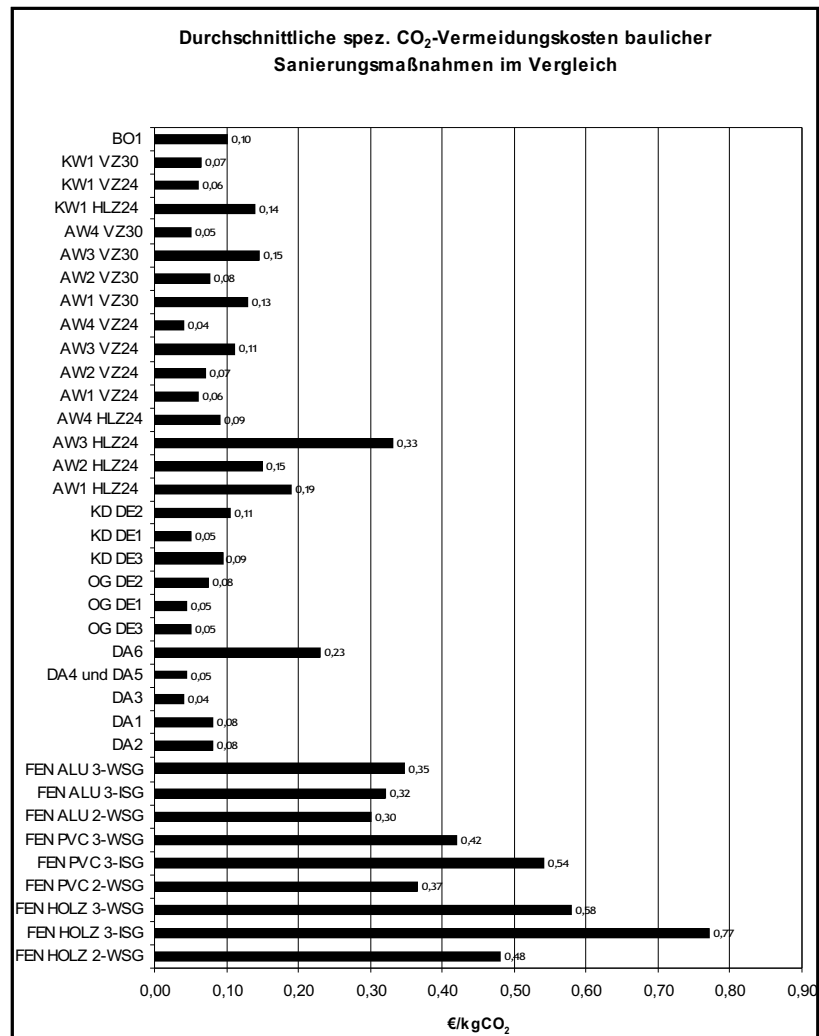


Abbildung 5.5: Spez. CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten baulicher Sanierungsmaßnahmen im Vergleich (Erläuterungen: s. Anhang A)

- Außenwandsanierungen generieren CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten zwischen 0,04 und 0,33 €/kgCO<sub>2</sub>. Die untere Grenze bildet die Innendämmung bei Gebäuden vor 1930, die obere Grenze „Hinterlüftete Fassade“ an Gebäuden ab 1960.
- Aufgrund der im Vergleich zu geringen Emissionsminderung hohen Investitionskosten, liefert die Fenstersanierung tendenziell hohe CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten. Diese liegen zwischen 0,30 €/kgCO<sub>2</sub> bei Fenstern mit Aluminiumrahmen (2-fach WSG) und 0,77 €/kgCO<sub>2</sub> bei Fenstern mit Holzrahmen (3-fach ISG).
- Die Innendämmung einer Außenwand mit WDVS führt zu den gleichen Einsparungen und Vorketten wie eine Außendämmung, weist aber aufgrund der geringeren Investitionskosten die geringsten CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten auf. Die nächst höheren CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten werden bei Außendämmung mit WDVS, und Sanierung mittels WDP generiert. Die Sanierungsvariante „Hinterlüftete Fassade“ weist die höchsten CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten auf.
- Die bestehende Anlagentechnik übt starken Einfluß auf die Höhe der CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten aus. Konventionelle Heizsysteme verursachen höhere betriebliche Emissionen und führen zu einer

signifikanten Emissionsminderung bei der Durchführung einer Maßnahme. Auf regenerativen Energien basierende (Holzheizungen) oder effiziente (KWK) Heizungssysteme sind im Betrieb emissionsärmer und dementsprechend findet eine Emissionsminderung nur auf niedrigem Niveau statt.

- Daraus wird ersichtlich, daß der Einfluß der Vorketten bei konventionellen Heizungssystemen geringer ist als bei regenerativen und BHKW-Heizsystemen.
- Höhere Dämmstärken führen tendenziell zur Abnahme der CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten. Ihr Einfluß bleibt jedoch gering. Gering ist auch der Einfluß des Dämmstoffs.

## 5.5 CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten apparativer Sanierungsmaßnahmen

Bei den apparativen Sanierungsmaßnahmen werden ältere Anlagen zugrunde gelegt und diese durch Anlagen ersetzt, die auf regenerativen Energien oder auf einer effizienteren Anlagentechnik basieren.

### 5.5.1 Umstieg auf eine effizientere Anlagentechnik

Beim Umstieg auf eine effizientere Anlagentechnik werden die Brennstoffe Heizöl, Erd- und Flüssiggas, jeweils in Anlagen der Niedertemperatur- und Brennwerttechnologie eingesetzt. Im Vergleich zur Niedertemperaturtechnik weist die Brennwerttechnik einen höheren Wirkungsgrad auf, erfordert aber höhere Investitionskosten.

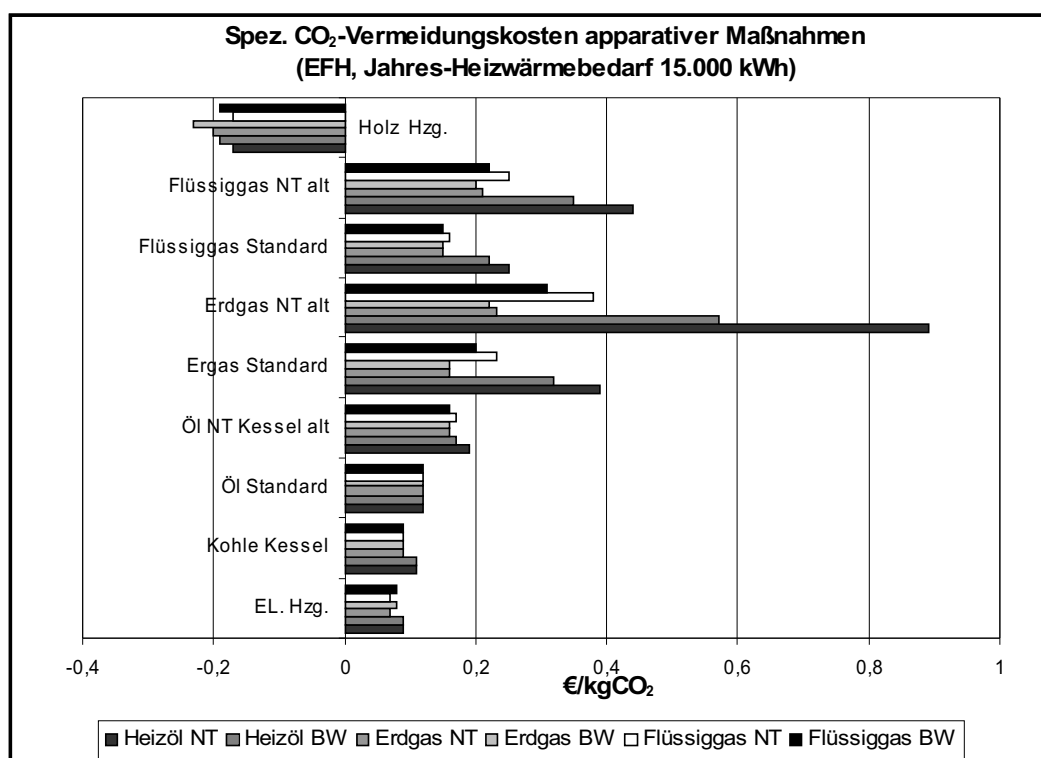


Abbildung 5.6: Spez. CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten apparativer Maßnahmen an einem EFH

Abbildung 5.6 zeigt einen typischen Verlauf der CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten am Beispiel eines Einfamilienhauses (EFH) mit einer Anlage der Leistung 15.000 kWh.

Die spezifischen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten verlaufen bei konventionellen Heizungssystemen ähnlich und bleiben dabei unter 1 €/kgCO<sub>2</sub>.

Ist die bestehende Anlage eine Holzheizung, so ist der Umstieg auf die betrachteten Alternativen mit negativen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten verbunden. Dieser Sachverhalt begründet sich dadurch, daß die betrieblichen Emissionen einer Holzanlage viel niedriger sind als die der betrachteten Alternativen sind (zum Vergleich: 0,05 bei einer Holzheizung statt 0,37 kgCO<sub>2</sub>/kWh bei Heizöl-BW-Anlage).

### 5.5.2 Übersicht

Tabelle 5.3 gibt die durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten apparativer Maßnahmen hin zu effizienterer Anlagentechnik. Die Werte wurden über die betrachteten Anlagengrößen gemittelt.

Tabelle 5.3: Mittelwerte der spez. CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten apparativer Sanierungsmaßnahmen

<i>Anlagentechnik</i>	<i>Heizöl NT</i>	<i>Heizöl BW</i>	<i>Erdgas NT</i>	<i>Erdgas BW</i>	<i>Flüssiggas NT</i>	<i>Flüssiggas BW</i>
El. Speicher Hgz.	0,05	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04
Kohle Kessel	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05
Heizöl Standard	0,07	0,07	0,06	0,07	0,07	0,06
Heizöl NT alt	0,11	0,1	0,08	0,09	0,09	0,09
Ergas Standard	0,22	0,18	0,09	0,09	0,13	0,11
Erdgas NT alt	0,52	0,33	0,13	0,13	0,21	0,16
Flüssiggas Standard	0,14	0,13	0,08	0,08	0,09	0,08
Flüssiggas NT alt	0,24	0,2	0,11	0,11	0,14	0,12
Holz Hgz. alt	-0,09	-0,11	-0,11	-0,13	-0,09	-0,11

- Die Elektrospeicherheizung und der Kohle-Festbrennstoffkessel dienen hier dem Vergleich. Bei ihrem Austausch durch ein modernes Heizsystem kommen geringe CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten (0,04 bis 0,06 €/kgCO<sub>2</sub>) zustande, da die Bestandstechnik hohen Ausstoß verursacht.
- Grundsätzlich ist der Ersatz betrachteter Heizsysteme durch energieeffiziente Systeme ökologisch sinnvoll.
- Bei bestehender alter Holzheizung entstehen negative CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten. Es können dabei effektiv keine Emissionen vermieden werden und daher wäre ihr Austausch aus rein ökologischen Gesichtspunkten in Frage zu stellen.

### 5.5.3 Umstieg auf regenerative Energieversorgung und BHKW-Anlagen

In Abbildung 5.7 werden die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten der Sanierungsmaßnahmen auf der Basis regenerativer Energien und KWK-Anlagen dargestellt.

Die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten des Umstiegs auf regenerative Energieversorgung oder auf KWK-Anlagen bewegen sich bei konventionellen Ausgangsanlagen zwischen 0,05 bis 1 €/kgCO<sub>2</sub>.

Auffällig sind die hohen Werte beim Umstieg von einer alten Holzheizung auf Heizungsanlagen auf der Basis von Photovoltaik und Wind. Trotz praktisch emissionsfreiem Betrieb sind diese Anlagen in der Herstellung sehr energie- und emissionsintensiv<sup>7</sup>.

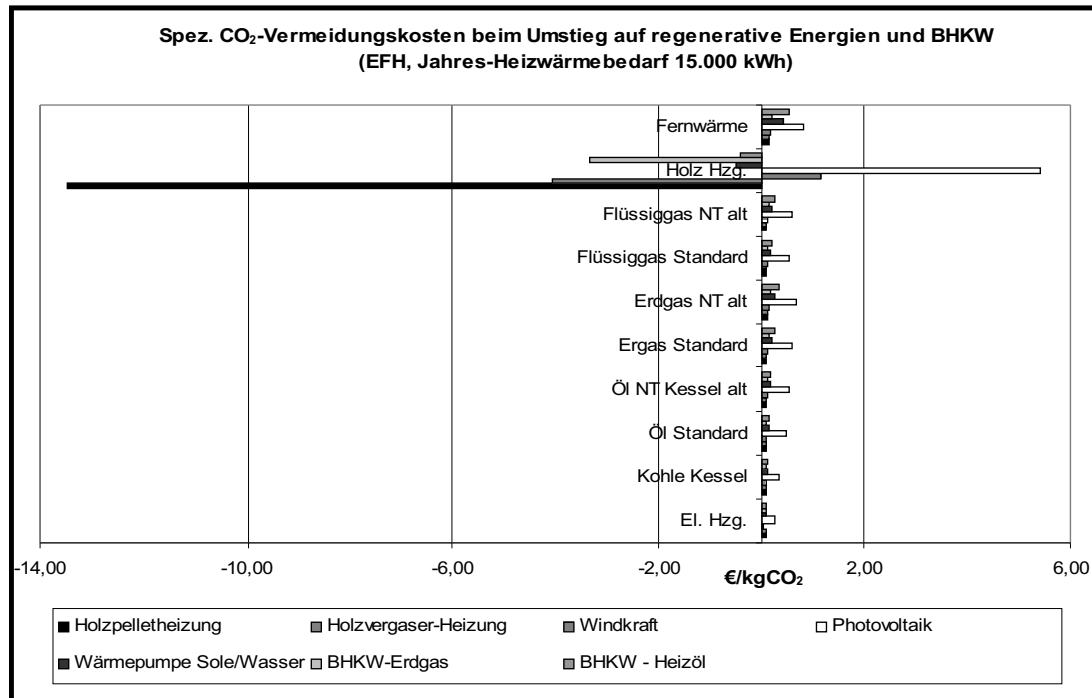


Abbildung 5.7: Spez. CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten beim Umstieg auf regenerative Energien und BHKW an einem EFH

Die Vorketten überschreiten hier die erzielten Einsparungen und führen so zu negativen, betragsmäßig großen Vermeidungskosten (Nähe zu singulären Stellen). Der Einsatz solcher Anlagen ist daher ökologisch in Frage zu stellen.

Beim Umstieg von einer Holzheizung auf die restlichen Technologien spiegeln die Ergebnisse den Zusammenhang zwischen den betrieblichen Emissionen und den Vorketten wider. Beim Einsatz von BHKW-Anlagen werden negative CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten generiert. Grund hierfür ist, daß hier kaum Emissionen im Betrieb eingespart werden können und so die Vorketten der Anlagenherstellung nicht kompensiert werden.

Stellvertretend sei hier der Umstieg von einer alten Holzheizung auf eine Holzpelletheizung diskutiert. Hier entstehen negative und betragsmäßig große CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten (ca. -14 €/kgCO<sub>2</sub>). Es können keine Einsparungen im Betrieb erzielt werden, denn beide Anlagen haben den gleichen Konversionswert 0,05 kgCO<sub>2</sub>/kWh. D.h., hier fallen lediglich Vorketten und Kosten an.

<sup>7</sup>Siehe Kapitel 4, Abschnitt 4.5.4

### 5.5.4 Übersicht

Die durchschnittlichen spezifischen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten apparativer Maßnahmen auf der Basis regenerativer Energieträger sowie BHKW werden in Tabelle 5.4 gemittelt über die Anlagengrößen zusammengetragen.

Tabelle 5.4: Durchschnittliche Spez. CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten beim Umstieg auf regenerative Energien und BHKW

<i>Anlagentechnik nach vor Umstieg</i>	<i>Holzpellets</i>	<i>Holz-Hzg.</i>	<i>Windkraft</i>	<i>Photo-voltaik</i>	<i>Wärme- pumpe</i>	<i>Öl- BHKW</i>	<i>Gas- BHKW</i>
El.Speicher Hzg.	0,04	0,04	0,04	0,31	0,07	0,06	0,05
Kohle Kessel	0,04	0,04	0,06	0,38	0,08	0,07	0,06
Heizöl Standard	0,05	0,05	0,09	0,67	0,1	0,08	0,05
Heizöl NT alt	0,06	0,06	0,11	0,82	0,12	0,1	0,06
Ergas Standard	0,06	0,06	0,12	0,94	0,14	0,14	0,08
Erdgas NT alt	0,07	0,07	0,13	1,16	0,18	0,19	0,09
Flüssiggas Standard	0,06	0,05	0,1	0,8	0,12	0,12	0,07
Flüssiggas NT alt	0,06	0,06	0,12	0,98	0,15	0,15	0,09
Holz Hzg. alt	-4,81	-2,16	1,78	-1,97	-0,29	-0,23	-1,9
Fernwärme	0,09	0,09	0,16	1,69	0,29	0,31	0,12

Folgende Beobachtungen konnten gemacht werden.

- Der Einsatz von Holzpellets- und Holzvergaserheizungen generiert die geringsten CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten (0,04 bis 0,09 €/CO<sub>2</sub> im positivem Bereich).
- Die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten beim Einsatz einer Wärmepumpe und eines BHKW sind höher als die von Holzpellets- bzw. Vergaserheizung. Der Konversionswert beträgt für Wärmepumpen und BHKW's 0,23 bzw. 0,25 kgCO<sub>2</sub>/kWh, dagegen für Holzpellets- und Holzvergaserheizungen ca. 0,05 kgCO<sub>2</sub>/kWh. D.h. erstere Anlagen können im Betrieb weniger Emissionen vermeiden als letztere.
- Die höchsten CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten entstehen beim Einsatz einer Photovoltaikanlage aufgrund der hohen Vorketten<sup>8</sup>. In Zahlen: Photovoltaikanlagen verursachen das ca. 50-fache im Vergleich zu Holzpellets und ca. zehnfache zu Windkraft an CO<sub>2</sub>-Emissionen während ihrer Herstellung. Ökologisch ist dies nicht zielführend.
- Der Einsatz einer Heizungsanlage auf der Basis von Windkraft führt zu positiven Vermeidungskosten. Die erzielten Einsparungen reichen zwar aus, um die Vorketten zu kompensieren; diese Maßnahmen sind jedoch aus ökologischer Sicht in Frage zu stellen.

## 5.6 Zusammenfassung und Fazit

Unter Berücksichtigung des wärmeschutztechnischen Ausgangszustands der Gebäudehülle und der bestehenden Anlagentechnik wurden Untersuchungen für typische bauliche und technische Gegebenheiten im Altbaubestand durchgeführt und dabei individuelle Einflußfaktoren sowie

<sup>8</sup>Siehe Kapitel 4, Abschnitt 4.5.4

geometrische Eigenschaften von Gebäuden außer Acht gelassen, um eine spätere Übertragbarkeit auf andere Gebäudearten möglich zu machen.

Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, daß im allgemeinen die meisten Sanierungsmaßnahmen ökologisch umsetzbar sind, wenn die bestehende Anlagentechnik eine ältere ist, die beim Betrieb einen hohen CO<sub>2</sub>-Ausstoß verursacht.

Liegt ein Heizsystem auf Basis regenerativer Energieträger oder KWK-Prinzip vor, handelt es sich um effiziente und/oder emissionsarme Anlagen. In diesem Fall können sowohl bauliche als auch apparative Maßnahmen oft keine nennenswerten CO<sub>2</sub>-Minderungen erzielen. Auch können die Vorketten der Maßnahmen in diesem Fall überwiegen. Sie können durch die CO<sub>2</sub>-Einsparungen über die Lebensdauer einer Maßnahme nicht kompensiert werden. Es entstehen negative spezifische CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten und die Maßnahmen werden insgesamt ökologisch nicht effektiv und damit nicht sinnvoll. Werden die Vorketten „gerade“ kompensiert, entstehen vergleichsweise hohe CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten (Nähe zu singulären Stellen). Die Maßnahmen sind in diesem Fall zwar rechnerisch ökologisch, hinsichtlich der Effizienz aber nicht ökonomisch.

Darüber hinaus lassen sich die ermittelten spezifischen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten einfach für eine gewünschte Kombination von Kreditzins und Kreditlaufzeit umrechnen, um so einer zeitlich gedehnten Finanzierung Rechnung zu tragen.

Es ist festzuhalten, daß spezifische CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten um 30 €/tCO<sub>2</sub> ohne Berücksichtigung von Erlösen aus den Energieeinsparungen erreichbar sind. Mit der Berücksichtigung von Kreditkosten erhöhen sich die Vermeidungskosten um Faktor 1,6 bis 3,2 je nach Zinssatz und Laufzeit des Kredits. Die Vermeidungskosten sind jedoch meist höher und können je nach Ausgangslage und ausgeführter Maßnahme auch die Marke von 900 €/tCO<sub>2</sub> überschreiten. Das macht deutlich, welche Kosten im Falle einer energetischen Sanierungsmaßnahme mit dem Ziel, Emissionen zu mindern, dem Eigentümer zugemutet werden müssen.

Diese Erkenntnisse motivieren die Suche nach Instrumenten, die die Kostenlast des Eigentümers verringern, um so seine Bereitschaft zu Sanierungsinvestitionen zu erhöhen und die Minderungspotentiale im Gebäudebereich zu mobilisieren.

## 6 Konzept eines Emissionshandels für Wohngebäude im Bestand

### 6.1 Inhalt des Kapitels

In der Einleitung dieser Arbeit wurde die Bedeutung des Altbaubestands für die CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung in Deutschland erläutert. Motiviert durch die schwierige Umsetzung dieser Ziele aufgrund mehrerer Gegebenheiten, wie z.B. dem Bestandsschutz und der oft (kurzfristig) nicht lukrativen Erlöse einer energetischen Sanierungsmaßnahme, wurde die Notwendigkeit neuer Ansätze erläutert.

Ein funktionierendes Zertifikatssystem macht die Einsparungen handelbar und hat zur Folge, daß der gesamtgesellschaftliche gewünschte (externe) Effekt zu einem privaten Nutzen für den Eigentümer (interner Effekt) und damit zu einer wirtschaftlichen Motivation zur Sanierung wird. In diesem Kapitel wird die Machbarkeit eines Emissionshandels auf der Grundlage von CO<sub>2</sub>-Zertifikaten für Wohngebäude im Bestand untersucht. Schwerpunkt bildet dabei die Überprüfung der Wirtschaftlichkeit unter ganzheitlichen Aspekten. Die Möglichkeiten der rechtlichen Rahmenbedingungen bzw. der Einbindung werden diskutiert. Desweiteren werden Vorschläge zur Implementierung und Überwachung sowie zum Ablauf des Handels formuliert.

In diesem Kapitel berücksichtigen die *effektiven CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten* nicht nur die Kosten, sondern auch die monetären Nutzeffekte wie mögliche Erlöse aus der Energieeinsparung und dem Emissionshandel.

### 6.2 Der CO<sub>2</sub>-Emissionshandel als Steuerungsinstrument

In der Ökonomie unterscheidet man zwischen *internen* und *externen* Effekten. „Eine ökonomische Situation weist einen externen Effekt im Konsum auf, wenn eine Konsumentin direkt durch die Produktion oder den Konsum eines anderen Akteurs berührt wird“ [Varian2004]. Bei externen Effekten geht es um Güter, für die aufgrund fehlender Eigentumsrechte kein Markt existiert. Die Umweltverschmutzung durch klimaschädliche Gase ist ein Beispiel dafür. Ohne gewollten Erwerb ist man gezwungen, das „Produkt“ CO<sub>2</sub> zu „konsumieren“. Die Folgen für die Konsumenten sind nur indirekter Art. Durch den CO<sub>2</sub>-Ausstoß und die damit einhergehende Umweltverschmutzung entstehen Kosten für die Gesamtheit.

Mit seinem Aufsatz „The Problem auf Social Cost“ [Coase1960] hat der englische Ökonom und Nobelpreisträger Ronald H. Coase den Grundstein gelegt für eine Allokationstheorie, später das Coase-Theorem genannt. Diese besagt, daß unter bestimmten Voraussetzungen durch Verhandlung zwischen den betroffenen Wirtschaftssubjekten ein optimales Niveau von externen Effekten erzielt werden kann, unabhängig davon, wem ursprünglich die Nutzungsrechte zugesprochen wurden [Fees1997]. Voraussetzung der Umsetzung dieser Theorie in die Praxis ist die Zuteilung von Nutzungs- bzw. Eigentumsrechten. Gegenwärtig werden auf Grundlage dieser Theorie Steuerungsmaßnahmen mit konkreten CO<sub>2</sub>-Minderungszielen durchgeführt. Der bestehende CO<sub>2</sub>-Emissionshandel in der Industrie basiert auf der Zuteilung von begrenzten Zertifikaten, die die Verursacher erwerben können.

Die Bedeutung des Altbaubestandes für die CO<sub>2</sub>-Emissionsminderungsziele wurde in Kapitel 1.4 erläutert. Zur Erinnerung: In 2004 verursachten private Haushalte ca. 13% der insgesamt in der Bundesrepublik angefallenen CO<sub>2</sub>-Emissionen.



Ein CO<sub>2</sub>-Emissionshandel auf der Grundlage von Zertifikaten als Steuerungsinstrument zur CO<sub>2</sub>-Minderung im privaten Wohnsektor würde erstmalig den externen Effekt „CO<sub>2</sub>-Ausstoß“ zu einem privaten „internen“ Effekt, auch der Verursacher im Gebäudesektor werden lassen. Das Einführen eines solchen Marktes für private Haushalte und die erfolgreiche Beteiligung an diesem Handel macht Gewinnaspekte der Handlungen unabdingbar. Auf dieser Grundlage muß und *kann* der Bestandsschutz vor dem Wirtschaftlichkeitsgrundsatz weichen.

## **6.3 Rechtliche Rahmenbedingungen eines CO<sub>2</sub>-Emissionshandels für Wohngebäude**

### **6.3.1 Europarichtlinien und Treibhaus-Emissionshandelsgesetz**

Die „Richtlinie 2002/91/EG des europäischen Parlamentes und des Rates vom 16. Dezember 2002 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden“ [EG2002] greift den Gebäudesektor bzw. das Sanierungspotential im Gebäudesektor auf. Gemäß Artikel 1 ist das Ziel der Richtlinie, die Verbesserung der Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden in der Gemeinschaft unter Berücksichtigung der jeweiligen klimatischen und lokalen Bedingungen zu bewirken sowie die Unterstützung der Anforderungen an das Innenraumklima und deren Kostenwirksamkeit.

Auch wenn ein Emissionshandel für den Gebäudesektor als Steuerungsinstrument in der Richtlinie 2002/91/EG nicht vorgesehen ist, wäre seine Etablierung grundsätzlich möglich. In der Begründung der Richtlinie 2003/87/EG des europäischen Parlaments über ein System für den Handel mit den Treibhausemissionszertifikaten in der Gemeinschaft vom 13. Oktober 2003 heißt es: „Diese Richtlinie sollte die Mitgliedstaaten nicht daran hindern, nationale Handelssysteme zur Regelung der Treibhausgasemissionen aus anderen als den in Anhang I aufgeführten [...] Anlagen, die vorübergehend aus dem Gemeinschaftssystem ausgeschlossen sind, beizubehalten oder einzuführen.“ [EG2003].

Die Einführung eines Emissionshandels mit dem Ziel der CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung im Gebäudesektor auf nationaler Ebene könnte also auch von der Europäischen Gemeinschaft unterstützt werden.

Der nationale Allokationsplan der Bundesregierung von 2006 enthält ausformulierte Minderungsziele für alle beteiligten Sektoren und Anlagen. Hier wäre ein weiterer Ansatzpunkt vorhanden, um im Mikroplan genauere Regelungen bezüglich des Gebäudesektors einzufügen bzw. die dort schon vorhandenen Regelungen des Industriesektors für den Gebäudesektor zu modifizieren.

Der momentan schon stattfindende Emissionshandel im Industriesektor gründet sich auf das Treibhaus-Emissionshandelsgesetz (TEHG). Die Integration des Gebäudesektors wäre über Modifikationen im Anwendungsbereich des TEHG denkbar. Voraussetzung ist, daß die Heizungsanlagen der Häuser als Feuerungsanlagen mit einer Wärmeleistung von unter 20 MW in den Anwendungsbereich des TEHG aufgenommen werden. Vorteilhaft wäre hier, daß die Hauseigentümer direkt in den bestehenden Handel eingegliedert würden.

Der Gebäudesektor müßte im THEG und entsprechend im nationalen Allokationsplan aufgenommen und genauer erfaßt werden. Der Erfüllungsfaktor für die Industrie kann theoretisch ebenfalls für den Gebäudesektor für gültig erklärt werden.

### 6.3.2 Bestandsschutz

Unter dem Begriff Bestandsschutz wird der Schutz einer Rechtsposition gegenüber späteren Rechtsänderungen verstanden.

Dieser Schutz begründet sich aus dem Grundrecht im Grundgesetz, Artikel 14 Abs. 1, der den folgenden Wortlaut enthält: „Das Eigentum und das Erbrecht werden gewährleistet. Inhalt und Schranken werden durch die Gesetze bestimmt.“

Nach [BVerfG, 1BvR 151/99], dem Beschluß des Bundesverfassungsgerichtes vom 24.07.2000, liegt ein durch Artikel 14 Abs. 1 GG bewirkter Bestandsschutz nur dann vor, wenn das Bauvorhaben zu irgendeinem Zeitpunkt genehmigt wurde oder jedenfalls genehmigungsfähig gewesen wäre.

### 6.3.3 Bestandsschutz und Energieeinsparungsgesetz im Konflikt

Das Energieeinsparungsgesetz (EnEG) bildet die Ermächtigungsgrundlage für die erlassenen Energieeinsparungsverordnungen. Dabei beziehen sich §1 Abs. 2 auf den baulichen Wärmeschutz, §2 Abs. 2 auf die Errichtung von Heizungs- und Brauchwasseranlagen und §3 Abs. 2 auf die Anforderungen an den Betrieb von Heizungs- und Brauchwasseranlagen.

In §4 Absatz 3 wird die Bundesregierung ermächtigt, Rechtsverordnungen zu erlassen und daß an „bestehende Gebäude, Anlagen oder Einrichtungen einzelne Anforderungen nach den § 1, §2 Abs. 1 und 2 und § 4 Abs. 1 gestellt werden können, wenn die Maßnahmen generell zu einer wesentlichen Verminderung der Energieverluste beitragen [...]“.

Hier besteht ein Konflikt mit dem Bestandsschutz. Um nun dem Schutz des Gebäudebestands gerecht zu werden und keinen Widerspruch im Recht zu konstruieren, wurde mit dem §5 EnEG die Ermächtigungsgrundlage (§1 - §3 EnEG) des Gesetzes durch einen Wirtschaftlichkeitsgrundsatz eingeschränkt. Dieser besagt, daß die in den Verordnungen geforderten Maßnahmen wirtschaftlich vertretbar sein müssen, was wiederum bedeutet, daß die getätigten Aufwendungen innerhalb der üblichen Nutzungsdauer durch die eingesparten Energiekosten erwirtschaftet werden können. „Sie können damit per Definition keine unzumutbare wirtschaftliche Härte und keinen verfassungswidrigen Eingriff in Artikel 14 des Grundgesetzes darstellen. Soweit in den Rechtsverordnungen dennoch Anforderungen formuliert sind, die im Einzelfall zu einer unbilligen Härte führen sollten, verlangt §5 Abs.2 EnEG, in den Rechtsverordnungen Befreiungstatbestände vorzusehen.“ [Heye2004]

Somit ist es also möglich, Sanierungsmaßnahmen zur CO<sub>2</sub>-Minderung durch Verordnungen trotz bestehendem Bestandsschutz verpflichtend zu machen, wenn sie den Ansprüchen der Wirtschaftlichkeit genügen.

### 6.3.4 Energieeinsparverordnung

Die Energieeinsparverordnung (EnEV) wurde 2002 auf Grundlage des EnEG erlassen, um seine Bestimmungen genauer auszuführen und einzugrenzen.

Zur Implementierung der Sanierungsvorschriften im Gebäudebestand sind die Abschnitte in der EnEV relevant, die alle energetisch relevanten Bauteile der Gebäudehülle betreffen. Im §9 „Nachrüstung bei Anlagen und Gebäuden“ werden in den Absätzen 1 und 2 die vorzunehmenden anlagentechnischen Änderungen beschrieben. In Absatz 3 wird die bisher einzige Vorschrift zur Dämmung eines Bauteiles im Bestand, nämlich die der Obergeschoßdecke, genauer der „nicht begehbaren, aber zugänglichen obersten Geschossdecke“ eingebracht.

Hier besteht die Möglichkeit weitere Bauteile in zusätzlichen Absätzen unter §9 zu integrieren und damit einem gesetzlich geregelten Voranschreiten der energetischen Sanierung des Altbaubestandes den Weg zu ebnen. Der Wirtschaftlichkeitsgrundsatz ist stets zu berücksichtigen, um einen rechtlichen Konflikt mit dem Eigentumsrecht zu vermeiden.

### 6.3.5 Problematik der Eigentümer und Nutzer

Nach [SBA2003C] existieren in Deutschland 42,2% Eigentümerhaushalte, 55,5% Hauptmieterhaushalte und 2,3% Untermieterhaushalte. Ein Eigentümer kann zur Durchführung von Sanierungsmaßnahmen verpflichtet werden. Doch wie gestaltet sich das bei einem Mieter? Die Antwort liefert das BGB §554 Absatz 2. Danach hat der Mieter Maßnahmen, die „zur Verbesserung der Mietsache, zur Einsparung von Energie oder Wasser oder zur Schaffung neuen Wohnraums“ dienen, zu dulden.

Durch bauliche Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle und den Einsatz effizienter Technik können der Heizwärmebedarf bzw. Heizenergiebedarf reduziert und die Energiekosten gesenkt werden. Hat nur der Mieter durch die Nebenkostenreduzierung einen Vorteil, geht die wirtschaftliche Motivation des Eigentümers verloren, Sanierungsmaßnahmen durchzuführen. Nur durch eine Anrechnung der Kosten auf den Mieter ist die notwendige Wirtschaftlichkeit für den Eigentümer gewährleistet. Nach dem Miethöhengesetz (MHG) ist sie auch rechters. Im §3 Abs. 1 heißt es, „Hat der Vermieter bauliche Maßnahmen durchgeführt, die [...] nachhaltig Einsparungen von Heizenergie oder Wasser bewirken (Modernisierung), oder hat er andere bauliche Änderungen auf Grund von Umständen, die er nicht zu vertreten hat, durchgeführt, so kann er eine Erhöhung der jährlichen Miete um elf vom Hundert der für die Wohnung aufgewendeten Kosten verlangen. Sind die baulichen Änderungen für mehrere Wohnungen durchgeführt worden, so sind die dafür aufgewendeten Kosten vom Vermieter angemessen auf die einzelnen Wohnungen aufzuteilen [...]“ [BGB1998].

## 6.4 Wohngebäude im Bestand – Eine Auswahl

Die Wahl der Referenzgebäude basiert auf der vom Institut für Wohnen und Umwelt erstellten Typologie des Gebäudebestands in Deutschland [IWU2003] (Tabelle 6.1).

Um die Anzahl der untersuchten Gebäudetypen einzugrenzen und dennoch repräsentative Ergebnisse liefern zu können, wird eine Auswahl der Gebäude getroffen. Als Altbau werden nach [Gertis1999] die Gebäude bezeichnet, die mehr als 150 bis 200 kWh/m<sup>2</sup>a Heizenergie verbrauchen. Dies trifft bei Gebäuden, die vor 1978 errichtet wurden, zu. Sie machen in den neuen Bundesländern ca. 79% und in den alten ca. 74% des gesamten Baubestands [SBA2003A] (Abbildung 1.2) aus. Da zur Zeit der Errichtung Verordnungen zur Energieeinsparung fehlten, verfügen diese Gebäude über große Energie- und damit CO<sub>2</sub>-Emissionseinsparpotentiale. Am 11.08.1977 wurde die erste Verordnung über einen energieeinsparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (WSchV77) erlassen. Diese trat am 01.11.1977 in Kraft. Bei Gebäuden, die danach errichtet wurden, ist mit geringeren Einsparpotentialen zu rechnen.

Die Abschätzungen des maximal möglichen technischen und wirtschaftlichen CO<sub>2</sub>-Minderungspotentials stützen sich daher auf die Gebäudeklassen B, C, D, E und F (in Tabelle 6.1. dunkelgrau unterlegt). Die Gebäudeklasse A der Fachwerkhäuser wird aufgrund der denkmalschutztechnischen Bestimmungen zu den Sanierungsmaßnahmen und den Abweichungen zu den anderen Gebäudeklassen außer Acht gelassen. Die Kategorien Hochhäuser (HH) und Sonderfälle wie z.B. der industrielle Wohnungsbau werden aus Gründen der schwierigen Datenerfassung und der Aufwandsbegrenzung nicht betrachtet.

Bei der Abschätzung des wirtschaftlichen CO<sub>2</sub>-Minderungspotentials wurde eine weitere Eingrenzung vorgenommen. Hier wurde eine Auswahl getroffen, die die Gebäude mit den höchsten technischen CO<sub>2</sub>-Minderungspotentialen darstellt.

Die Auswahl erfolgte dementsprechend erst nach der Ermittlung des technischen CO<sub>2</sub>-Minderungspotentials. Im einzelnen sind diese die Einfamilienhäuser Typ C Baujahr 1919-1948 (EFH\_C), die Reihenhäuser Typ D 1949-1957 (RH\_D), die Mehrfamilien- und Groß Mehrfamilienhäuser Typ E Baujahr 1958-1968 (MFH\_E, GMH\_E). In die Abschätzung des technischen und wirtschaftlichen Minderungspotentials gehen bauphysikalische (z.B. U-Werte der Bauteile), geometrische (z.B. Außenflächen, A/V<sub>e</sub>-Verhältnis), nutzungstechnische (z.B. Anzahl der Wohnungen und Wohnfläche) und anlagentechnische Parameter ein. Tabelle 6.2 enthält Angaben zu den wichtigsten Eingangsparametern der betrachteten Gebäude im Ist-Zustand.

Tabelle 6.1: Deutsche Gebäudetypologie nach IWU (ohne Sonderfälle)

Baualterklasse	EFH	RH	MFH	GMH	HH
A vor 1918					
B vor 1918					
C 1919-1948					
D 1949-1957					
E 1958-1968					
F 1969-1978					
G 1979-1983					
H 1984-1994					
I 1995-2001					
J nach 2002					

Tabelle 6.2: Eingangsparameter betrachteter Gebäude im Ist-Zustand

Eingangsparameter	Gebäudetyp			
	EFH_C	RH_D	MFH_E	GMH_E
	1919-1948	1949-1957	1958-1968	1958-1968
Beheizte Wohnfläche [m <sup>2</sup> ]	275,0	136,0	2844,6	3534,0
Mittlere lichte Raumhöhe [m]	2,75	2,55	2,61	2,5
Beheiztes Gebäudevolumen [m <sup>3</sup> ]	1053	469	10397	13166
Anzahl Vollgeschosse	2	2	4	8
Anzahl Wohneinheiten	2	1	32	48
Decke/Dach				
Fläche m <sup>2</sup>	214,0	81,2	971,1	479,6
U-Ist [W/m <sup>2</sup> K]	1,11	0,78	2,30	0,82
Außenwände				
Fläche m <sup>2</sup>	237,3	136,7	2041,0	3249,8
U-Ist [W/m <sup>2</sup> K]	1,70	0,86	1,21	1,30
Kellerdecken				
Fläche m <sup>2</sup>	144,9	81,2	971,1	459,2
U-Ist [W/m <sup>2</sup> K]	1,11	1,01	0,97	0,85
Fenster Süd				
Fläche m <sup>2</sup>	22,0	25,7	243,2	26,6
g (senkr. Strahlungseinfall)	0,76	0,80	0,76	0,86
U-Ist [W/m <sup>2</sup> K]	2,57	2,90	2,57	5,20
Fenster West/Ost				
Fläche m <sup>2</sup>	18,2	0,0	44,5	646,1
g (senkr. Strahlungseinfall)	0,76	0,80	0,76	0,86
U-Ist [W/m <sup>2</sup> K]	2,57	2,90	2,57	5,20
Fenster Nord				
Fläche m <sup>2</sup>	12,2	16,2	219,8	14,3
g (senkr. Strahlungseinfall)	0,76	0,80	0,76	0,86
U-Ist [W/m <sup>2</sup> K]	2,57	2,90	2,57	5,20
Spez. Transmissionswärmeverlust [kWh/a]	808	319	6232	8434
Spez. Lüftungswärmeverlust [kWh/a]	200	89	1975	2501
Solare Gewinne [kWh/a]	4299	3876	40742	53034
Interne Gewinne [kWh/a]	6050	2992	62581	77748
Jahresheizwärmebedarf [kWh/a]	56699	20432	443537	597527
Flächenbezog. Jahresheizwärmebedarf [kWh/(m <sup>2</sup> a)]	206	150	156	169
Jährlicher CO <sub>2</sub> -Ausstoß [kgCO <sub>2</sub> /a]				
bei Standard Öl Heizung vor 1995	31751	11442	248381	334615

## 6.5 Betrachtung und Behandlung von Vorketten

Bei der Ermittlung der CO<sub>2</sub>-Minderung nach der Durchführung von Sanierungsmaßnahmen wurden zwei Vorgehensweisen bzw. Vereinfachungen gewählt, die hier eine Begründung finden sollen.

Zum einen wurde die effektive CO<sub>2</sub>-Minderung angesetzt, d.h. die Vorketten wurden von der direkt erzielten CO<sub>2</sub>-Einsparung abgezogen. Zum anderen wurden diese Vorketten auf die Lebensdauer bzw. Kreditlaufzeit der Maßnahmen umgelegt. Der Frage, ob die Berücksichtigung der Vorketten eine Doppelberücksichtigung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes und damit seiner Kosten darstellt, nämlich einmal in der Industrie und einmal bei privat initiierten Sanierungsmaßnahmen, wird im folgenden nachgegangen.

Der Emissionshandel in der Industrie integriert alle Industriebetriebe, die in der Richtlinie 2003/87/EG aufgeführt werden, in den Emissionshandel [EG2003]. Diese sind nach Anhang 1 der Richtlinie Anlagen zur:

- Energieumwandlung und –umformung
  - Feuerungsanlagen mit einer Feuerungswärmeleistung über 20 MW
  - Mineralölraffinerien
  - Kokereien
- Eisenmetallerzeugung und –verarbeitung
  - Röst- und Sinteranlagen für Metallerz (einschließlich Sulfiderz)
  - Anlagen für die Herstellung von Roheisen
- Mineralverarbeitende Industrie
  - Zementklinker oder von Kalk in Drehrohröfen
  - Glas einschließlich Glasfasern mit einer Schmelzkapazität über 20 t /Tag
  - keramischen Erzeugnissen durch Brennen
- Sonstige Industrieanlagen zur Herstellung von
  - Zellstoff aus Holz und anderen Faserstoffen
  - Papier und Pappe mit einer Produktionskapazität über 20 t/Tag.

Die Branchen zur Herstellung von Dämmstoffen und energetisch wärmedämmenden Bauteilen werden in den Emissionshandel einbezogen. Man könnte davon ausgehen, daß die Industrie die CO<sub>2</sub>-Zertifikatskosten in die Preise der hergestellten Produkte einpreist. Eine nochmalige Berücksichtigung der Vorketten in den Berechnungen könnte dann zu Überschneidungen in der Gesamtbilanz der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Gebäudesektor führen. Nach [BMU079/06] kann die Industrie aber in der Praxis die Einpreisung nicht vollständig vornehmen, da sie im internationalen Wettbewerb steht und solche Zusatzkosten nur schwer in die Preise einkalkulieren kann. Die Gefahr der Bestrafung des Sanierers durch einen höheren Produktpreis ist also als gering einzuschätzen. Die Richtlinie nennt auch nur Industriebetriebe, die z.B. über 20 Tonnen Schmelzkapazität pro Tag aufweisen. Die Betriebe, die unter dieser Kapazitätsgrenze liegen, werden die zusätzlichen Kosten nicht einpreisen müssen und so Wettbewerbsvorteile erhalten. Da hier keine vollständige Berücksichtigung der Branchen erfolgt, ist bei Nichtbeachtung der Vorketten keine konsequente Vorgehensweise gewährleistet.

In Anbetracht dieser Überlegungen, scheint die Berücksichtigung der Vorketten, die die Reduzierung der effektiven CO<sub>2</sub>-Minderung zur Folge haben, die sinnvollere Lösung zu sein. Dadurch wird eine ganzheitliche Betrachtungsweise im Sinne der Ökologie gewährleistet, die für die CO<sub>2</sub>-Minderungsziele geboten ist.

Ein weiterer wichtiger Punkt der in dieser Arbeit angewendeten Methodik ist das Umlegen der Vorketten auf die Betrachtungszeiträume. Bei der Beurteilung einer Sanierungsmaßnahme werden die direkt durch die Maßnahme erzielte CO<sub>2</sub>-Einsparung und die Vorketten gegenübergestellt und die effektive CO<sub>2</sub>-Minderung ermittelt. Während die CO<sub>2</sub>-Einsparungen jährlich über die gesamte Lebensdauer der Maßnahme erzielt werden, fallen die Vorketten einmalig an und nehmen eher einen kurzen Zeitraum in der Bilanzierung ein. Das Umlegen der Vorketten auf einen bestimmten Betrachtungszeitraum (Betriebs- oder Lebensdauer einer Heizungsanlage bzw. Maßnahme oder Kreditlaufzeit) könnte somit die Ergebnisse verfälschen und zu falschen Schlußfolgerungen führen.

Ein Umlegen kann aber rechnerisch sinnvoll sein, wenn die Maßnahmen trotz Vorketten noch ökologisch effektiv sind. In diesem Kapitel werden die effektiven CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten der Sanierungsmaßnahmen erst nach der Überprüfung dieser Bedingung ermittelt. Für weitere Untersuchungen bzw. Berechnungen wurden nur die ökologisch sinnvollen Sanierungsmaßnahmen weiter betrachtet. Dies wird durch die dafür angepasste Struktur der Berechnungen gewährleistet. So kommen für den hier angetriebenen Handel mit CO<sub>2</sub>-Zertifikaten automatisch nur ökologisch effektive Maßnahmen in Betracht.

Da das Ziel dieser Arbeit im Nachweis der Machbarkeit und der Wirtschaftlichkeit eines CO<sub>2</sub>-Emissionshandels im Wohngebäudesektor liegt, ist ein Umlegen der Vorketten auf einen bestimmten Betrachtungszeitraum aus den genannten Gründen vertretbar.

## 6.6 Technische Rahmenbedingungen eines CO<sub>2</sub>-Emissionshandels

Erfolgreiche und effiziente Strategien zur CO<sub>2</sub>-Minderung setzen Kenntnisse über die technisch möglichen Ziele voraus. Darauf aufbauend, ist eine Wirtschaftlichkeit der Sanierungsmaßnahmen eher bei Gebäuden mit hohen Minderungspotentialen zu erwarten.

Das technische CO<sub>2</sub>-Minderungspotential der vor 1978 errichteten Gebäude wird in diesem Abschnitt unter der Annahme des folgenden Szenario bestimmt: Zunächst wird baulich saniert, anschließend apparativ. Dabei wird nach vier Gebäudetypen differenziert: Einfamilienhäuser (EFH), Reihenhäuser (RH), Mehrfamilienhäuser (MFH) und Großmehrfamilienhäuser (GFH).

### 6.6.1 Technisches Minderungspotential für gegebene Gebäudetypen und Beheizungsart

Das jährliche technische Minderungspotential (TMP) pro Gebäude wird nach (6.1) berechnet. Es setzt sich aus den CO<sub>2</sub>-Minderungen der baulichen und anschließenden apparativen Maßnahmen abzüglich der Vorketten zusammen.

$$(6.1) \quad TMP = \frac{-CO_{2,v}}{n} + \varphi_{alt} \kappa_{alt} \Delta Q + (\varphi_{alt} \kappa_{alt} - \varphi_{neu} \kappa_{neu}) Q$$

mit

$TMP$  Jährliches technisches Minderungspotential in tCO<sub>2</sub>/a

$CO_{2,v}$  Vorketten der jeweiligen Maßnahmen tCO<sub>2</sub>/a

$n$  Lebensdauer der Sanierungsmaßnahme in Jahren

$\Delta Q$  Jährliche Heizwärmeeinsparung bei baulichen Sanierungsmaßnahmen in kWh/a

$Q$  Jährlicher Heizwärmebedarf bei apparativen Sanierungsmaßnahmen in kWh/a

$\varphi_{alt}$  Verminderungsfaktor für Leitungsverluste im Gebäude für den alten Zustand, bei Rohrleitungen 1,15

$\varphi_{neu}$  Verminderungsfaktor für Leitungsverluste im Gebäude für den neuen Zustand, bei Rohrleitungen 1,15

$\kappa_{alt}$  Konversionswert des alten bzw. bestehenden Heizsystems nach Tabelle 5.2/Spalte 2 in kgCO<sub>2</sub>/kWh

$\kappa_{neu}$  Konversionswert des neuen Heizsystems nach Tabelle 5.2/Spalte 2 in kgCO<sub>2</sub>/kWh



Zur Berechnung des technischen CO<sub>2</sub>-Minderungspotentials wurde wie folgt vorgegangen:

- Zunächst wurden die spezifischen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten der einzelnen Bauteilsanierungen aus Kapitel 5 verglichen und die Maßnahmen mit den „besten“ spezifischen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten ausgesucht und angewendet. Beste CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten sind in diesem Zusammenhang die kleinsten. Dabei wurde der Ist-Zustand des Gebäudes hinsichtlich Konstruktion und Wärmeschutz beachtet.
- Die jährliche Heizwärmeeinsparung bzw. der jährliche Heizwärmebedarf wurden mit dem vereinfachten Heizperiodenverfahren nach EnEV abgeschätzt und anschließend in ihre CO<sub>2</sub>-Äquivalente umgerechnet.
- Statt der Nutzfläche wurde abweichend vom Verfahren die tatsächlich beheizte Wohnfläche angesetzt. Das führt zu einem leichten Anstieg des rechnerischen und zulässigen Jahresprimärenergiebedarfs, ist aber für den Altbau konsequenter.
- Die Einhaltung des EnEV-Standards stand nicht im Mittelpunkt, wurde aber überprüft.
- Es findet zunächst eine umfassende Sanierung der Gebäudehülle statt. Dabei wurden mehrere Szenarien (unterschiedliche Konstruktionen und Materialien) untersucht mit dem Ziel, die maximal mögliche und ökonomische Minderung zu erreichen.
- Bei der anschließenden apparativen Sanierung wird bei Öl bzw. Erdgas die Referenzanlagentechnik „vor 1995 eingebaute Standard-Heizung“ zugrunde gelegt. Im Zuge der Sanierung wird auf die Brennwertechnologie, auf Kraft-Wärme-Koppelung oder auf Holzpelletsheizung umgestiegen.
- Eine bestehende Elektro-Nachtspeicherheizung wird gegen ein neues Heizsystem ausgetauscht, während Fernwärme aufgrund des günstigen betrieblichen CO<sub>2</sub>-Äquivalents beibehalten wird.
- Ferner wurde die Möglichkeit bedacht, im Zuge einer apparativen Maßnahme auf andere Energieträger umzusteigen. Die angesetzten Umstiegsraten sind der Tabelle 6.3 zu entnehmen.

Tabelle 6.3: Angenommene Umstiegsrate auf andere Heizsysteme in %

<i>Umstiegsrate [%]</i>	<i>Ausgangstechnik</i>			
	Öl-Standard Hzg vor 1995	Gas-Standard Hzg vor 1995	Strom- Nachtspeicher	Fernwärme
Öl-BW	85	0	45	-
Gas-BW	10	95	50	-
Holzpellets	4	4	4	-
KWK	1	1	1	-

### 6.6.2 Sanierungsanteil im Bestand

Die Berechnungen zum technischen CO<sub>2</sub>-Minderungspotential basieren auf dem Ist-Zustand des Gebäudes. Da davon auszugehen ist, daß sich nicht alle Gebäude, die vor 1978 errichtet wurden, im Ur-Zustand befinden und diese bereits zumindest teilsaniert wurden, gilt es, einen Modernisierungs- bzw. Sanierungsanteil abzuschätzen.

Das Forschungsprojekt Integriertes Klimaschutzprogramm INKLIM 2012, im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz, bildet die wissenschaftliche Basis für das Hessische Klimaschutzprogramm. Bei der Studie zum Themenbereich Wärmeversorgung von Gebäuden geht das IWU davon aus, daß die Gebäudehülle von 25% des gesamten Gebäudebestandes energetisch umfassend modernisiert wurde [EnsDieHin2005]. Bezogen auf die vor 1978 errichteten Gebäude, die ca. 75% des hessischen Gebäudebestands darstellen, beträgt der Modernisierungsanteil ca. 56%.

In dieser Arbeit wurden bei der Ermittlung des technischen Minderungspotentials Komplettsanierungen betrachtet. Es wird daher angenommen, daß sich durchschnittlich 60% der vor 1978 errichteten Gebäude noch im unsanierten Zustand befinden.

### 6.6.3 Beheizungsstruktur im Bestand

Detaillierte Datenerhebungen zur Beheizungsstruktur, die nach Baualtersklasse der Gebäudetypen differenzieren, existieren derzeit noch nicht. Nach [UBA2004] ist bei der Beheizungsstruktur in Deutschland die Verteilung in Tabelle 6.4 anzunehmen.

Tabelle 6.4: Beheizungsstruktur ( $e_E$ ) in % nach [UBA2004]

<i>Energieträger</i>	<i>Neue Bundesländer</i>		<i>Alte Bundesländer</i>	
	EFH und RH	MFH und GFH	EFH und RH	MFH und GFH
<i>Fernwärme</i>	14	47	1	14
<i>Öl</i>	29	11	50	36
<i>Gas</i>	51	42	39	44
<i>Strom</i>	6	-	10	6

### 6.6.4 Gebäudeanzahl nach Gebäudetyp und Beheizungsart

Die Gebäudeanzahl  $N_G$  nach Energieträger, Baualtersklasse und Gebäudetyp wurde nach (6.2) bestimmt.

$$(6.2) \quad N_G = 0,6 e_E \frac{A_W}{A_{W,b}}$$

mit

$N_G$  Gebäudeanzahl nach Energieträger, Baualtersklasse und Gebäudetyp (Tabelle 6.5)

$0,6$  Anteil der energetisch vollständig sanierbaren Gebäude

$e_E$  Anteil des Energieträgers in % nach Tabelle 6.4

$A_W$  Wohnfläche der Gebäude nach Baualtersklasse und Haustyp in  $m^2$

$A_{W,b}$  beheizte Wohnfläche des jew. Gebäudetyps und der Baualtersklasse in  $m^2$ .

Tabelle 6.5: Gebäudeanzahl  $N_G$  nach Gebäudetyp und Energieträger im Ausgangszustand

<i>Geb. Typ</i>	<i>Energie- träger</i>	<i>Gebäudeanzahl <math>N_G</math></i>				
		<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>
<i>EFH</i>	<i>Erdgas</i>	356.868	144.237	308.106	200.923	290.065
<i>RH</i>		87.386	112.691	64.549	147.227	215.139
<i>MFH</i>		141.518	91.269	60.981	17.973	84.084
<i>GMH</i>		15.026	2.335	2.883	3.766	6.807
<i>EFH</i>	<i>Öl</i>	371.084	151.864	363.111	255.678	359.813
<i>RH</i>		112.873	145.559	83.375	190.168	277.888
<i>MFH</i>		99.002	58.692	46.947	13.644	66.670
<i>GMH</i>		6.600	1.946	2.402	2.805	4.490
<i>EFH</i>	<i>Fernwärme</i>	40.435	15.704	20.397	6.888	13.102
<i>RH</i>		2.427	3.130	1.793	4.090	5.976
<i>MFH</i>		69.252	51.596	24.079	7.356	30.597
<i>GMH</i>		12.612	723	892	1.615	3.696
<i>EFH</i>	<i>Strom</i>	78.782	32.268	77.692	54.941	77.210
<i>RH</i>		24.274	31.303	17.930	40.896	59.761
<i>MFH</i>		15.581	8.033	7.098	2.049	10.221
<i>GMH</i>		637	305	377	417	624

### 6.6.5 Abschätzung des gesamten technischen Minderungspotentials

Tabelle 6.6 gibt das technisch mögliche Gesamt-Minderungspotential an. Der EnEV-Standard wird von den MFH und GMH meist erreicht, während die EFH und RH den Grenzwert oft überschreiten. Grund ist, daß Mehrfamilien- und Großmehrfamilienhäuser eine kompaktere Baugeometrie und damit kleinere  $A/V_e$ -Verhältnisse als die Gebäude EFH und RH aufweisen.

Tabelle 6.6: Technisches Minderungspotential (TMP) der betrachteten Gebäude in tCO<sub>2</sub>/a

<i>Heiztechnik</i>	<i>Maßnahmen</i>	<i>EFH</i>	<i>RH</i>	<i>MFH</i>	<i>GMH</i>
<i>Öl-Standard H<sub>z</sub>g vor 1995</i>	<i>Bauliche Maß.</i>	19.461.953	4.005.407	8.659.114	1.947.994
	<i>Gas-BW 10 %</i>	436.201	117.767	199.583	40.860
	<i>Öl-BW 85%</i>	2.709.480	731.512	1.239.714	253.802
	<i>Holzpellets 4 %</i>	332.855	89.865	152.297	31.179
	<i>KWK 1 %</i>	52.512	14.177	24.027	4.919
	<i>Summe TMP</i>	22.993.000	4.958.728	10.274.735	2.278.754
<i>Gas-Standard H<sub>z</sub>g vor 1995</i>	<i>Bauliche Maß.</i>	13.715.470	2.491.843	9.611.858	2.365.769
	<i>Gas-BW 95 %</i>	2.066.901	499.705	1.486.763	339.529
	<i>Holzpellets 4 %</i>	223.951	54.143	161.092	36.788
	<i>KWK 1 %</i>	29.444	7.119	21.180	4.837
	<i>Summe TMP</i>	16.035.766	3.052.810	11.280.893	2.746.922
<i>Strom-Nachtspeicher H<sub>z</sub>g</i>	<i>Bauliche Maß.</i>	8.015.151	1.661.228	2.495.421	523.356
	<i>Gas-BW 50 %</i>	1.398.424	379.892	451.450	85.216
	<i>Öl-BW 45 %</i>	1.145.632	311.219	369.842	69.812
	<i>Holzpellets 4 %</i>	145.723	39.586	47.043	8.880
	<i>KWK 1 %</i>	29.869	8.114	9.643	1.820
	<i>Summe TMP</i>	10.734.799	2.400.042	3.373.399	689.084
<i>Fern</i>	<i>Bauliche Maß.</i>	555.218	35.378	2.243.238	653.326
<i>Ges. TMP</i>	<b>94.306.091 tCO<sub>2</sub>/a</b>				

### 6.6.6 Fazit

Die Ergebnisse zur Berechnung des technischen Minderungspotentials sind in Abbildung 6.1 dargestellt. Ausgehend vom CO<sub>2</sub>-Ausstoß der betrachteten Gebäude im unsanierten Zustand, wird das technische Minderungspotential der jeweiligen Gebäudetypen und von diesen zusammen in tCO<sub>2</sub>/a dargestellt.

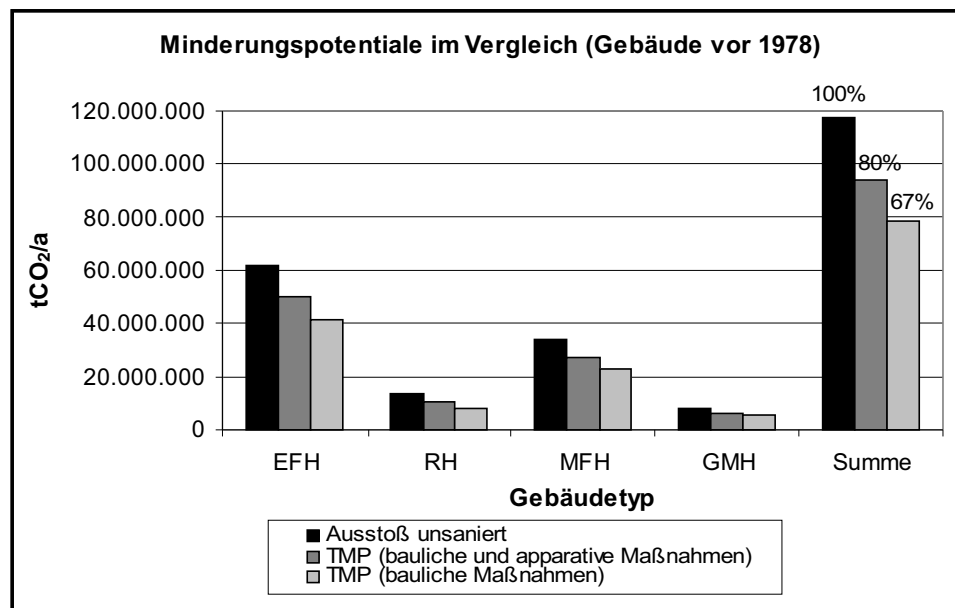


Abbildung 6.1: CO<sub>2</sub>-Ausstoß und technisches Minderungspotential der vor 1978 errichteten Gebäude im Vergleich

Der CO<sub>2</sub>-Ausstoß der betrachteten Gebäude beträgt im unsanierten Zustand ca. 117,5 Mio tCO<sub>2</sub>/a, also ca. 96% des 2000 angefallenen Ausstoßes von 122 Mio t.

Werden nur bauliche Maßnahmen realisiert, beträgt das technische Minderungspotential der vor 1978 errichteten Gebäude ca. 67%. Bei Hinzuziehen von anschließenden apparativen Maßnahmen ist sogar eine 80%ige Minderung technisch möglich.

Nach [NAP2006] betrug der CO<sub>2</sub>-Ausstoß der privaten Haushalte im Zeitraum 2000-2002 durchschnittlich 122,7 Mio. tCO<sub>2</sub>/Jahr. Das hier ermittelte technische Minderungspotential würde demnach eine Reduzierung von ca. 77% erlauben. Die Ergebnisse der Untersuchungen [EbEiFei1992] bzw. [Walz1997] lagen bei 70 bzw. 90%. Das hier ermittelte Minderungspotential ist also belastbar und kann für die weiterführenden Untersuchungen in dieser Arbeit verwendet werden.

Unter dem Gesichtspunkt, daß Gebäude mit Baujahr vor 1978 ca. 75% des bundesweiten Gebäudebestandes repräsentieren und bei Gebäuden jüngeren Baujahres erheblich weniger Einsparpotentiale vorhanden sind, belegt das errechnete technische Minderungspotential die enormen, aber nicht genutzten Potentiale im Altbaubestand. Die Berechnung berücksichtigt allerdings nicht, ob eine Maßnahme im monetären Sinne lohnenswert ist oder nicht. Das Minderungspotential sinkt laut [Enquête1995] bei der Einbeziehung von Wirtschaftlichkeitsgedanken auf 50%.

Da der Wirtschaftlichkeitsgedanke für ein ökonomisch bestimmtes Handeln die entscheidende Rolle spielt, wird im weiteren Verlauf dieses Kapitels der Fokus auf die Wirtschaftlichkeitsanalyse der Maßnahmen gelegt. Dabei gilt es zu prüfen, ob ein Emissionshandel im privaten Gebäudesektor Maßnahmen wirtschaftlicher umsetzen läßt oder diese sogar erst lohnenswert macht und damit eine wirtschaftliche Motivation liefern kann, emissionsmindernde Maßnahmen am Gebäude durchzuführen.

## 6.7 Wirtschaftlichkeitsanalyse eines CO<sub>2</sub>-Emissionshandels

### 6.7.1 Ansatz und Annahmen

#### 6.7.1.1 Berechnung der effektiven CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten

Die Wirtschaftlichkeit von Sanierungsmaßnahmen wird im folgenden anhand der *effektiven* CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten geprüft. Der Begriff CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten wird hier um das Adjektiv „effektiv“ erweitert, da hier Erlöse aus der Energieeinsparung und dem Verkauf von CO<sub>2</sub>-Zertifikaten in der Betrachtung Berücksichtigung finden und somit von der Definition nach [Kasz1997] abgewichen wird.

Mit den berechneten Annuitäten, Erlösen und CO<sub>2</sub>-Minderungen lassen sich die Kosten der Minderung um eine Tonne CO<sub>2</sub> berechnen nach<sup>9</sup>:

$$(6.3) \quad VK_{eff} = \frac{Z - (E_E + E_Z)}{CO_{2,E} - CO_{2,V}} \quad \text{bei } CO_{2,E} \neq CO_{2,V}$$

mit

$VK_{eff}$  effektive CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten der Maßnahme in €/tCO<sub>2</sub>a

$Z$  jährlich zu leistenden Zahlung (Annuität) in €/a

$E_E$  Erlöse aus Energieeinsparung in €/a

$E_Z$  Erlöse aus Zertifikatshandel in €/a

$CO_{2,E}$  unmittelbar durch die Maßnahme erzielbare CO<sub>2</sub>-Einsparung in tCO<sub>2</sub>/a

$CO_{2,V}$  CO<sub>2</sub>-Vorketten, auf die Lebensdauer umgelegt in tCO<sub>2</sub>/a.

Die Erlöse  $E_E$  und  $E_Z$  sind über die Lebensdauer dynamisch, werden aber vereinfachend als konstant angenommen. Der Einfluß einer Energie- und Zertifikatspreisänderung auf die effektiven CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten wird dafür im Rahmen der Sensitivitätsanalyse untersucht (s. Kapitel 6.7.4).

Die wirtschaftlichste Maßnahme ist jene mit den geringsten effektiven CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten. Die Erlöse durch Energieeinsparung und Zertifikatsverkauf gehen in den Zähler als negative Werte ein (negative Kosten = Einnahmen). Daher sind die Maßnahmen wirtschaftlich, wenn ihre effektiven CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten negativ sind. Da alle Eingangsgrößen in Gleichung (6.3) auf ein Jahr bezogen sind, gilt dies auch für die effektiven Vermeidungskosten. Sie liefern somit eine Aussage über die jährlichen Kosten oder Gewinne einer Maßnahme.

Für die Wirtschaftlichkeitsanalyse werden folgende Schritte durchgeführt bzw. Annahmen getroffen:

- Die Wirtschaftlichkeitsanalyse erfolgt für bauliche Sanierungsmaßnahmen. Anschließend apparative Sanierungsmaßnahmen werden nur exemplarisch betrachtet (s. Abschnitt 6.7.3).
- Es wird die gleiche Beheizungsstruktur angenommen, wie bei der Ermittlung des technischen Minderungspotentials (s. Abschnitt 6.6.3). Im folgenden werden die Ergebnisse exemplarisch unter der Annahme einer Öl-Heizung dargestellt. Für die Berechnung des gesamten wirtschaftlichen Minderungspotentials in Abschnitt 6.7.5 werden alle Beheizungsarten und ihre Verteilung im Bestand berücksichtigt.

<sup>9</sup>Siehe Erläuterungen zum Nenner der Gleichung (5.2)

- Es werden die Sanierungsvarianten mit den besten effektiven CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten nach (6.3) ausgewählt. Dazu findet eine wirtschaftliche Optimierung statt, die bei der breiten Datenbasis und dem großen Aufwand automatisiert werden mußte. Ökologisch nicht effektive Maßnahmen werden automatisch ausgeschlossen. Die effektiven CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten werden für mehrere Szenarien (aus Kapitel 5) unter Variation der Sanierungsalternativen, der Materialalternativen und ggf. der Dämmstärke ermittelt. Es ist beabsichtigt, eine Anlage mit diesen Berechnungen zu erstellen.
- Die jährlichen Annuitäten werden so ermittelt, daß der aufgenommene Kredit am Ende der Investitionslaufzeit vollständig zurückgezahlt ist.
- Der CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreis wird zu 25 €/tCO<sub>2</sub> angenommen. Auf eine Berücksichtigung zukünftiger Preissteigerungen wird hier verzichtet, da sich die genaue Preisentwicklung nicht seriös vorhersagen läßt. Die im Vergleich dazu geringen Preissteigerungen durch die Inflation werden deshalb ebenfalls vernachlässigt.

### 6.7.1.2 Investitionsrechnung

Bei einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung bzw. Investitionsrechnung ist zwischen statischen und dynamischen Verfahren zu unterscheiden.

Statische Verfahren werden zum Vergleich von Investitionsalternativen mit gleichem Kapitaleinsatz und gleicher Laufzeit herangezogen. Dagegen ist es bei Anwendung dynamischer Verfahren möglich, zeitlich unterschiedlich anfallende Zahlungsströme zu berücksichtigen. Diese werden auf den Zeitpunkt der ersten Zahlung diskontiert bzw. abgezinst. Da sich Sanierungsmaßnahmen bezüglich ihrer Lebensdauer und Investitionskosten unterscheiden, eignen sich für die durchgeführten Investitionsrechnungen dynamische Verfahren am besten. Im folgenden wird die Annuitätenmethode angewandt.

Bei den Investitionen werden Kosten für Instandhaltung oder Schadensbehebung nicht berücksichtigt. Es wird der Zinssatz für Baukredite von 6% angesetzt. Die anfallenden Investitionen für eine Sanierungsmaßnahme werden als Bankkredit aufgenommen. Sie werden gleichmäßig über den Investitionszeitraum in konstanter Höhe zurückgezahlt. Die Höhe der Gesamtinvestition  $I$  ergibt sich zu:

$$(6.4) \quad I = Z \frac{1 - \frac{1}{(1+r)^t}}{r}$$

Daraus ergibt sich die periodisch zu leistende Annuität  $Z$  zu:

$$(6.5) \quad Z = I \frac{r}{1 - \frac{1}{(1+r)^t}}$$

Dabei ist

- |     |   |
|-----|---|
| $I$ | Gesamtinvestitionskosten über den gesamten betrachteten Zeitraum in € |
| $Z$ | konstante, in jeder Periode zu leistende Annuität in €                |
| $r$ | Zinssatz in %/100   |
| $t$ | Betrachtungszeitraum in Jahren.                                       |

### 6.7.1.3 Betrachtete Maßnahmen am Beispiel der Außenwände

Bei der Wirtschaftlichkeitsanalyse wird eine Auswahl der ausgeführten Konstruktionen bzw. eingesetzten Materialien im Zuge einer Sanierungsmaßnahme getroffen. Diese orientiert sich an den Erkenntnissen aus den Untersuchungen zu den Vorketten und den spezifischen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten aus den Kapiteln 4 und 5. Anders als in diesen Kapiteln wird aber die Wirtschaftlichkeitsanalyse an konkreten Gebäuden untersucht, so daß einige Sanierungsvarianten ausgeschlossen werden können. So wird z.B. bei der Sanierung der Außenwände die Variante „Hinterlüftete Fassade“ aufgrund der hohen Investitionskosten nicht weiter betrachtet. Eine Innendämmung kommt eher selten zum Einsatz, z.B. bei Denkmalschutzaufgaben, und wird unter dem Aspekt des Wohnraumverlustes und möglicher Feuchteschäden gerne umgangen. Es wird daher bei den Außenwandsanierungen nur die gängigste Lösung des Wärmedämmverbundsystems (WDVS) untersucht. Desweiteren werden die Dämmstoffe Steinwolle (STW), expandierter Polystyrol-Hartschaum (EPS) und Hanf eingesetzt. Diese Auswahl geschieht vor dem Hintergrund, alle drei Dämmstoffgruppen (mineralische, künstlich organische und natürlich organische Stoffe) zumindest exemplarisch zu erfassen. Zwar sind die ersten zwei Gruppen bei der Herstellung energie- und emissionsintensiv, stellen jedoch die gängigsten Lösungen dar. Da es in diesem Kapitel um repräsentative Aussagen über den möglichen Beitrag eines Emissionshandels geht und die ökologische Effektivität ohnehin geprüft wird, wird die Auswahl beibehalten.

### 6.7.1.4 Überlegungen zum angesetzten Zertifikatspreis

Mit dem Inkrafttreten des sog. „Zuteilungsgesetzes für die Handelsperiode 2005 bis 2007“ am 31.08.2004 startete der Emissionshandel für die Industrie. Verschmutzungsrechte in €/tCO<sub>2</sub> werden seitdem an der European Energy Exchange (EEX) in Leipzig gehandelt.

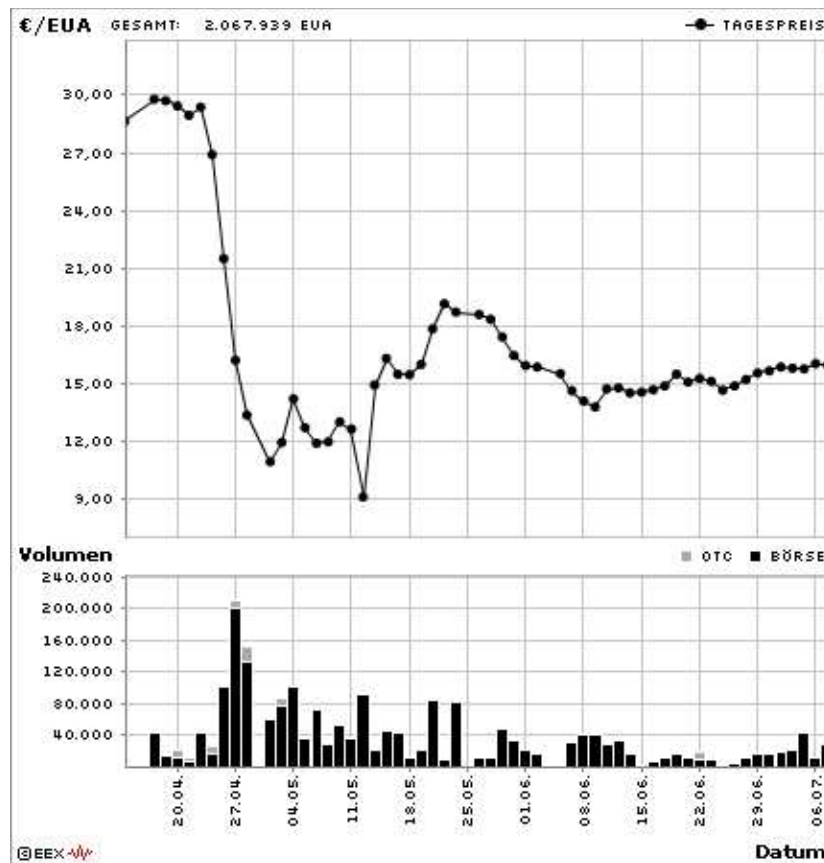


Abbildung 6.2: Entwicklung des Zertifikatspreises [EEX2006]



Zunächst kletterte der Zertifikatspreis nach oben. Mitte April 2006 wurde sogar die 30 €/tCO<sub>2</sub>-Marke erreicht. Ende April 2006 folgte der Absturz; der Zertifikatspreis lag teilweise unter 9 Euro. Grund war eine Überversorgung der Märkte, nachdem darauf spekuliert wurde, daß einige europäische Regierungen Unternehmen zu viele Zertifikate zugeteilt haben. Am 6. Juli 2006 lag der Preis bei 16 €/tCO<sub>2</sub>.

Theoretisch hängt der Zertifikatspreis von vielen Faktoren ab. Kurzfristige Einflußfaktoren sind u.a. Wetter und Klima, allgemeine wirtschaftliche Entwicklung, Brennstoff- und Strompreise. Langfristige Einflußfaktoren sind politischer bzw. technischer Art. Diese sind u.a. der Anteil erneuerbarer Energien an der Energieerzeugung, die CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten der betroffenen Sektoren, der Umfang der Projekte nach dem Joint Implementation (IJ) und Clean Development Mechanism (CDM), Allokationspläne von EU und Regierungen [Wirsching2004].

Abgesehen vom Kursabsturz, der durch den Überhang an Zertifikaten bzw. Spekulationen verursacht wurde, ist seit der Einführung des Emissionshandels eine Preisentwicklung zu beobachten, die stark von der Strompreisentwicklung dominiert wird. Die Korrelation zwischen Zertifikats- und Strompreisen in Abbildung 6.3 ist nicht nur eindeutig, sondern auch von den Energieunternehmen gewollt. Diese preisen die kostenlos zugeteilten Zertifikate zu Marktpreisen in die Kalkulation ihrer Energiepreise ein (Opportunitätskosten).

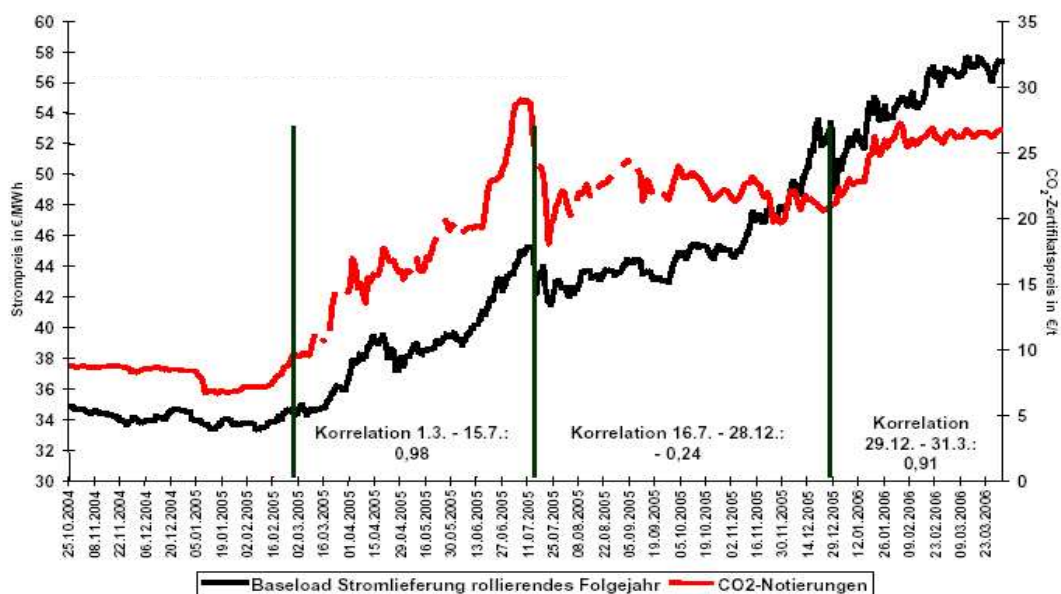


Abbildung 6.3: Entwicklung der Strompreise und CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreis [VIK2006]

Aus betriebswirtschaftlicher Sicht ist das ein rationales Verhalten, das die Wirkung des Emissionshandels effizienter macht. Zusätzlich wird die ökologische Notwendigkeit an nachgelagerte Sektoren weitergegeben, die klimaschädlichen Emissionen zu mindern. Zum einen war aber diese Lenkungswirkung politisch nicht gewollt. Zum anderen sind die Zertifikate gerade auf Druck der Industrie kostenlos zugeteilt worden, um zusätzliche Belastungen zu vermeiden [Ecologic2005].

In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, daß der Preis sich wieder nach oben bewegen wird. Für die durchgeführten Untersuchungen wurde ein Zertifikatspreis von 25 €/tCO<sub>2</sub> angesetzt.

### 6.7.2 Wirtschaftlichkeitsanalyse baulicher Maßnahmen

Wie bereits im Abschnitt 6.4 erwähnt, wird die Wirtschaftlichkeitsberechnung exemplarisch durchgeführt. Für die Gebäude RH\_D, EFH\_C, MFH\_E und GMH\_E sind die eff. CO<sub>2</sub>-Vermeidungskostenkurven bei der Annahme einer Öl-Standardheizung in den Abbildungen 6.4 bis 6.7 dargestellt. Die CO<sub>2</sub>-Minderungen für die jeweiligen Sanierungsmaßnahmen werden auf der X-Achse aufsummiert und abgetragen. Dabei werden CO<sub>2</sub>-Minderungen der wirtschaftlich effizientesten Maßnahmen zuerst aufgetragen. Die Y-Achse stellt für die entsprechende CO<sub>2</sub>-Minderung die Kosten in Euro pro vermiedene Tonne CO<sub>2</sub> und Jahr dar.

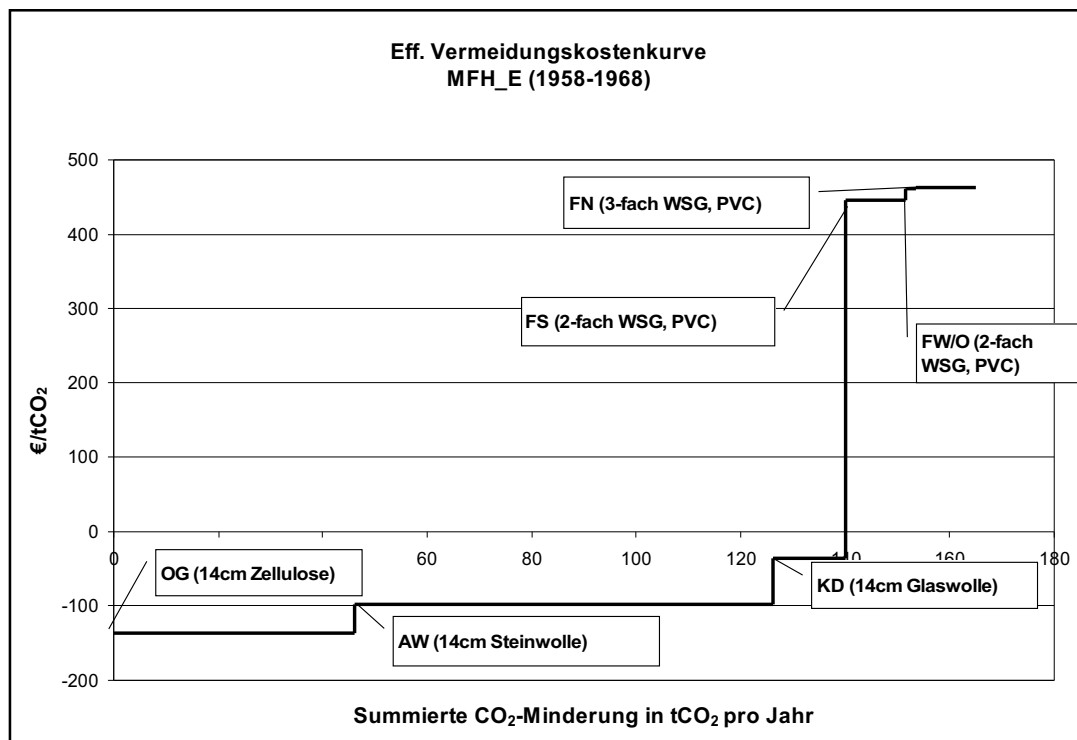
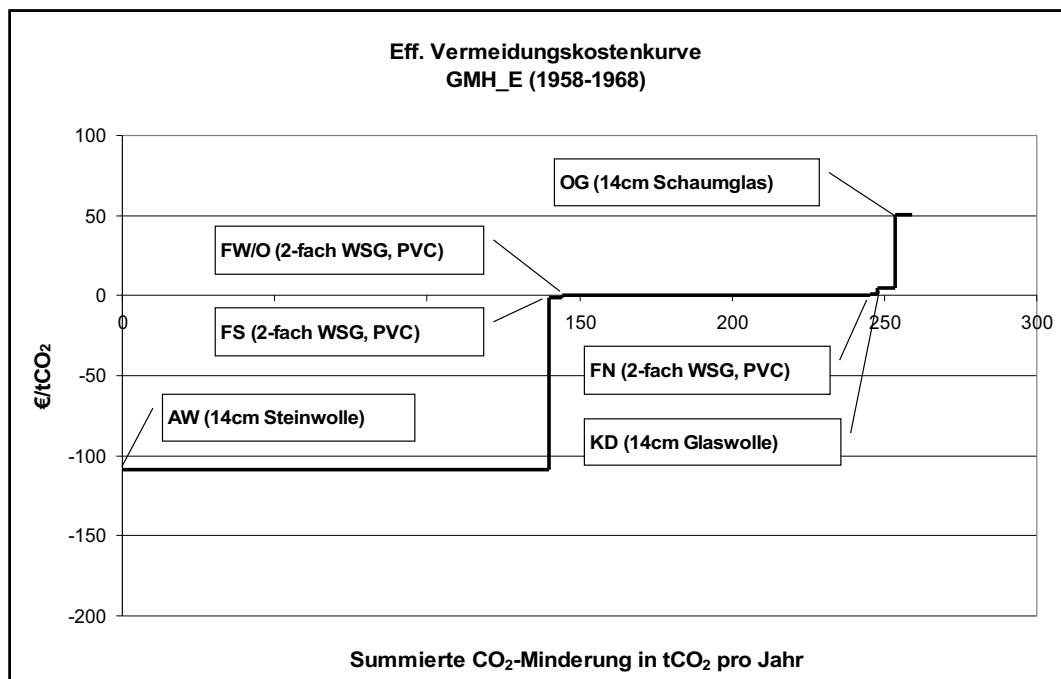


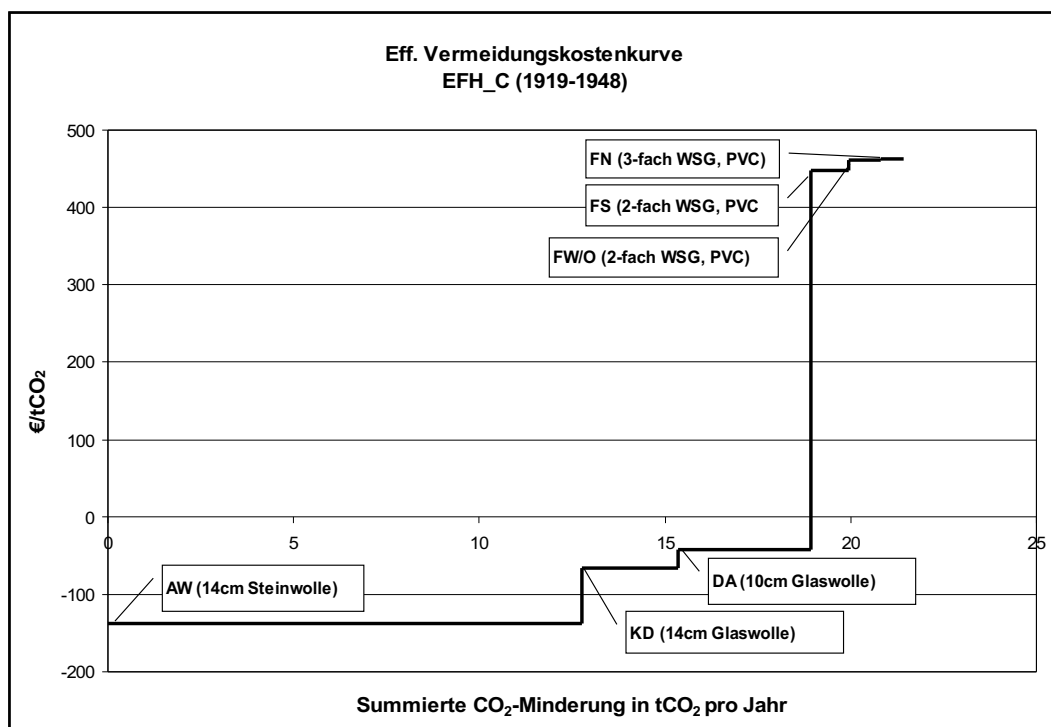
Abbildung 6.4: Eff. CO<sub>2</sub>-Vermeidungskostenkurve des MFH\_E bei Öl Hzg. vor 1995

Da die einzelnen Maßnahmen jeweils einen festen Beitrag zur Gesamtminderung liefern, weist die effektive CO<sub>2</sub>-Vermeidungskostenkurve einen stufenförmigen Verlauf auf. Positive Werte bedeuten, daß die Maßnahmen unwirtschaftlich sind, d.h. die Einnahmen decken nicht die Ausgaben für Investitionen während des Investitionszeitraums. Insgesamt würden keine Gewinne erzielt, sondern Kosten verursacht. Negative Werte (negative Kosten) bedeuten, daß die Maßnahmen insgesamt Erlöse erzielen.

Für den Gebäudetyp MFH\_E (Abbildung 6.4) ist die Maßnahme Dämmung der Obergeschoßdecke (14 cm Zellulose) am wirtschaftlichsten, gefolgt von der Dämmung der Außenwand (14 cm Steinwolle) und der Kellerdecke (14 cm Glaswolle). Die restlichen abgebildeten Maßnahmen sind unwirtschaftlich. Die wirtschaftlich umsetzbare CO<sub>2</sub>-Minderung beläuft sich auf ca. 140 tCO<sub>2</sub>/a. Bis zu dieser Marke muß der Sanierer entweder keine Kosten tragen bzw. kann sogar Gewinne erzielen. Das technische Minderungspotential liegt bei diesem Gebäude und der Durchführung baulicher Maßnahmen bei 169 tCO<sub>2</sub>/a, d.h. ca. 83% des technischen Minderungspotentials ist wirtschaftlich realisierbar.

Abbildung 6.5: Eff. CO<sub>2</sub>-Vermeidungskostenkurve des GMH\_E bei Öl Htzg. vor 1995

Bei dem Gebäudetyp GMH\_E (Abbildung 6.5) sind mit Ausnahme der Dämmung der Obergeschoßdecke alle Dämmmaßnahmen mit wirtschaftlichem Gewinn realisierbar. Eine Minderung von bis zu ca. 250 tCO<sub>2</sub> im Jahr ist dabei möglich.

Abbildung 6.6: Eff. CO<sub>2</sub>-Vermeidungskostenkurve des EFH\_C bei Öl Htzg. vor 1995

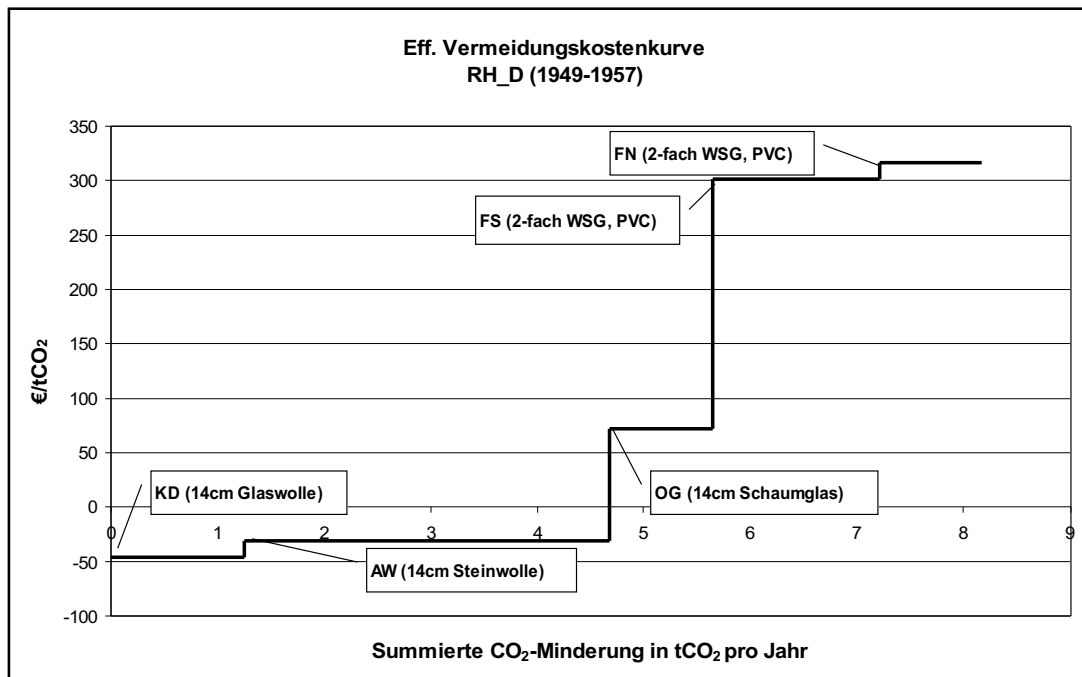


Abbildung 6.7: Eff. CO<sub>2</sub>-Vermeidungskostenkurve des RH\_D bei Öl Hzg. vor 1995

Das EFH\_C weist ein wirtschaftliches Minderungspotential von 18,9 tCO<sub>2</sub>/a und damit rd. 84% des technischen Minderungspotentials auf (Abbildung 6.6). Für das RH\_D sind ca. 60 % des technischen Minderungspotentials von ca. 8,2 tCO<sub>2</sub>/a wirtschaftlich umsetzbar (Abbildung 6.7).

Bei nahezu allen untersuchten Gebäuden stellt sich eine Fenstermodernisierung als die kostenintensivste Maßnahme heraus mit dem daran gemessenen geringsten Minderungspotential. Meist ist zunächst die Sanierung der Bauteile Außenwände, OG-Decke, Kellerdecke und Dach zu empfehlen. Die hier getroffenen Aussagen zum wirtschaftlichen Minderungspotential gelten bei der Durchführung von ausschließlich baulichen Maßnahmen.

Das wirtschaftliche Minderungspotential dürfte sich erheblich erhöhen, wenn anschließend auch apparative Sanierungsmaßnahmen durchgeführt werden. Das empfiehlt sich auch in Anbetracht der Ergebnisse nach der Durchführung von wirtschaftlichen baulichen Sanierungsmaßnahmen. Statt weiter baulich zu sanieren, z.B. die Fenster zu modernisieren, kann eine apparative Maßnahme sinnvoller sein.

### 6.7.3 Wirtschaftlichkeitsanalyse bei baulichen und anschließenden apparativen Maßnahmen - Ein Beispiel

Grundsätzlich empfiehlt es sich, im Anschluß an die Verbesserung der wärmeschutztechnischen Qualität der Gebäudehülle, apparative Maßnahmen durchzuführen. Die Reihenfolge ergibt sich durch die Tatsache, daß für den reduzierten Heizwärmebedarf eine kleinere Heizungsanlage ausreichend ist. Im umgekehrten Fall wäre die Heizungsanlage überdimensioniert und die Maßnahme somit nicht ökonomisch. Die Integration von apparativen Maßnahmen in die Untersuchungen dieser Arbeit gestaltet sich wegen dieser wechselseitigen Wirkung als schwierig. Sind bestimmte Dämmmaßnahmen auf Grundlage einer alten Heizungsanlage rechnerisch lohnenswert und würde anschließend ein effizienteres Heizsystem eingesetzt, könnten andere neue Dämmmaßnahmen wirtschaftlicher erscheinen, da z.B. der Energieträger und damit sein Preis ein anderer geworden ist. Die Menge der Einsparungen und der Energiepreis entscheiden letztlich über

die gesamtökonomische Effizienz einer Maßnahme. Um zumindest exemplarisch die Potentiale einer apparativen Sanierung aufzeigen zu können, werden solche Gedanken außer Acht gelassen. Im folgenden werden die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse bei der Durchführung von baulichen und apparativen Maßnahmen exemplarisch für das Gebäude GMH\_E dargestellt.

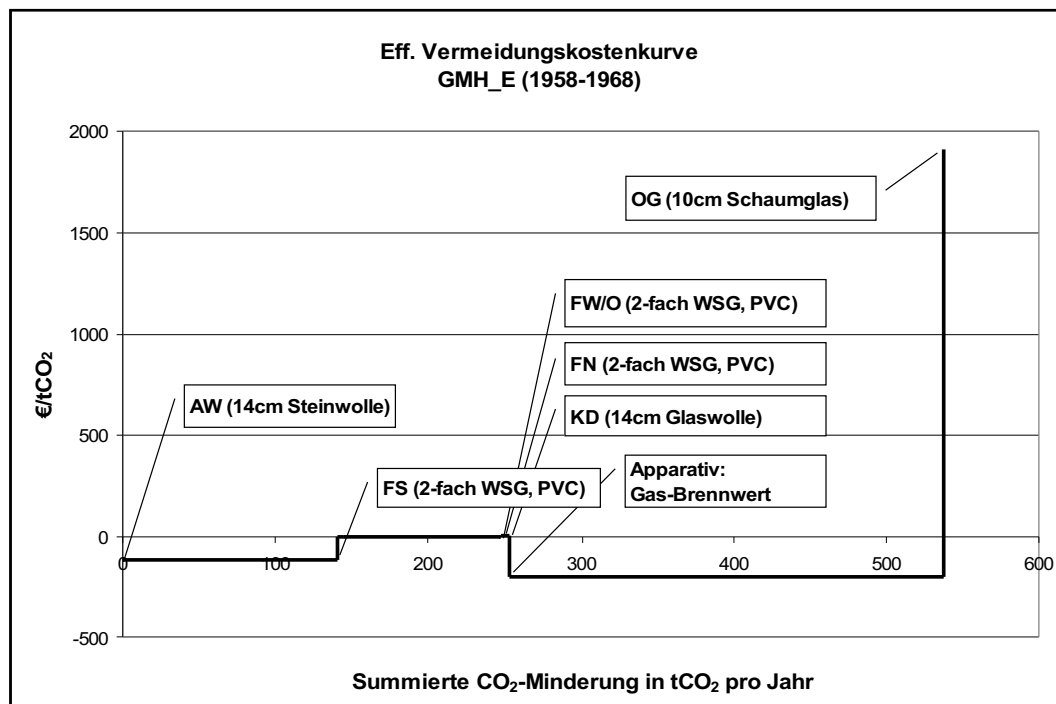


Abbildung 6.8: Eff. CO<sub>2</sub>-Vermeidungskostenkurve GMH\_E bei baulichen und apparativen Maßnahmen, Öl Htzg. vor 1995

Auf Grundlage der angenommenen Heizungsanlage (Öl-Standard vor 1995) wurden zunächst bauliche Sanierungsmaßnahmen beurteilt. Die Sanierung der Außenwände, der Fenster und der Kellerdecke wiesen dabei die günstigeren effektiven CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten als die Dämmung der Obergeschoßdecke auf. Daher wurde die Dämmung der Obergeschoßdecke zunächst nicht vorgenommen. Anschließend wurden apparative Maßnahmen auf der Grundlage des neuen reduzierten Heizwärmebedarfs beurteilt. Die Heizsysteme Gas-Brennwertkessel, Öl-Brennwertkessel und Holzpellets sind dabei betrachtet worden. Abbildung 6.8 zeigt, daß sich ein Gas-Brennwertkessel als die günstigste Variante herausstellt. Mit -196 €/tCO<sub>2</sub> effektiven CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten liegt er knapp unter der Variante Öl-Brennwertkessel mit -194 €/tCO<sub>2</sub>. Die Holzpelletsheizung weist effektive CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten von -182 €/tCO<sub>2</sub> auf. Zwar erzielt diese die größeren CO<sub>2</sub>-Minderungen und damit auch die höheren Einnahmen aus Energieeinsparung und Zertifikatsverkauf, die Investitionskosten liegen aber um ca. 20% höher als bei einem Gas-Brennwertkessel.

Es ist festzuhalten, daß die Integration einer apparativen Maßnahme am GMH\_E eine wirtschaftlich umsetzbare Minderung von insgesamt ca. 540 tCO<sub>2</sub>/a bringt. Im Vergleich dazu: Die baulichen Maßnahmen bringen eine Minderung von 250 tCO<sub>2</sub>/a. Eine Steigerung um fast 116% ist also möglich.

## 6.7.4 Sensitivitätsanalyse

### 6.7.4.1 Allgemeines

Bei der Bewertung von Sanierungsmaßnahmen hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit spielen Faktoren wie Investitionszeitraum, Zinssatz, Energieeinsparpotential und Energiepreis eine wichtige Rolle. Mit einer Sensitivitätsanalyse wurde die Auswirkung der Schwankungen des Energiepreises und Zinssatzes auf die Höhe der effektiven CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten (und damit die Wirtschaftlichkeit) einer Maßnahme näher beleuchtet. Auch die Frage, ob ein Zertifikatssystem den entscheidenden Anreiz zur Durchführung von Sanierungsmaßnahmen bringen kann, kann hier weitgehend beantwortet werden. Zusätzlich wurde die Auswirkung der Schwankungen vom Zertifikatspreis, wie sie in der CO<sub>2</sub>-Börse üblich sind, simuliert. Die Ergebnisse werden exemplarisch an umfassenden baulichen Sanierungen der Gebäude MFH\_E bzw. GMH\_E (Baujahr 1958-68) dargestellt. Die X-Achse stellt die variierten Eingangsparameter, die Y-Achse die minimalen effektiven CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten der einzelnen Maßnahmen dar. Um eine Übersichtlichkeit zu gewährleisten, wird auf die Zuweisung der effektiven CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten an die jeweiligen Maßnahmen und auf die Details derselben verzichtet. Tabelle 6.7 enthält die Eingangsparameter.

Tabelle 6.7: Eingangsparameter für die Sensitivitätsanalyse

<i>Parameter</i>	<i>Parameterwert</i>	<i>Einheit</i>
Zinssatz	6	[%]
Energiepreis (Heiz-Öl)	0,65	[€/l]
Zertifikatspreis	25	[€/tCO <sub>2</sub> ]
Investitionszeitraum und Lebensdauer der Maßnahme		
Außenwand	25	[Jahre]
Dach, Kellerdecke, OG-Decke und Fenster	20	[Jahre]

### 6.7.4.2 Einfluß des Energiepreises und des Zinssatzes

Ausgehend von einem Referenzfall mit einem Energiepreis (EP) von 0,65 €/l und einem Zinssatz (ZS) von 6%, werden die effektiven CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten einzelner Maßnahmen bei gleichem ZS für EP= 0,2 €/l und EP= 3 €/l berechnet, um einen Bereich möglicher Energiepreise abzugrenzen. Desweiteren wurde der Fall betrachtet, das sich EP und ZS etwa verdoppeln, d.h. EP= 1,30 €/l und ZS= 10% (Tabelle 6.8 / Abbildung 6.9).

Tabelle 6.8: Betrachtete Szenarios (Energiepreis, Zinssatz)

<i>Szenario</i>	<i>Energiepreis (EP) in €/l</i>	<i>Zinssatz (ZS) in %</i>
Referenzfall	0,65	6
Szenario A	0,20	6
Szenario B	3,00	6
Szenario C	1,30	10

Im Fall der Verdoppelung von EP und ZS bleibt die Rangfolge der Sanierungsmaßnahmen, die Wahl der Dämmstoffe und der Dämmstärke erhalten. Bei den wirtschaftlichen Maßnahmen, hier der Dämmung der Außenwand, der Keller- und Obergeschoßdecke, können erheblich mehr Erlöse erzielt werden (teilweise Verdreifachung).

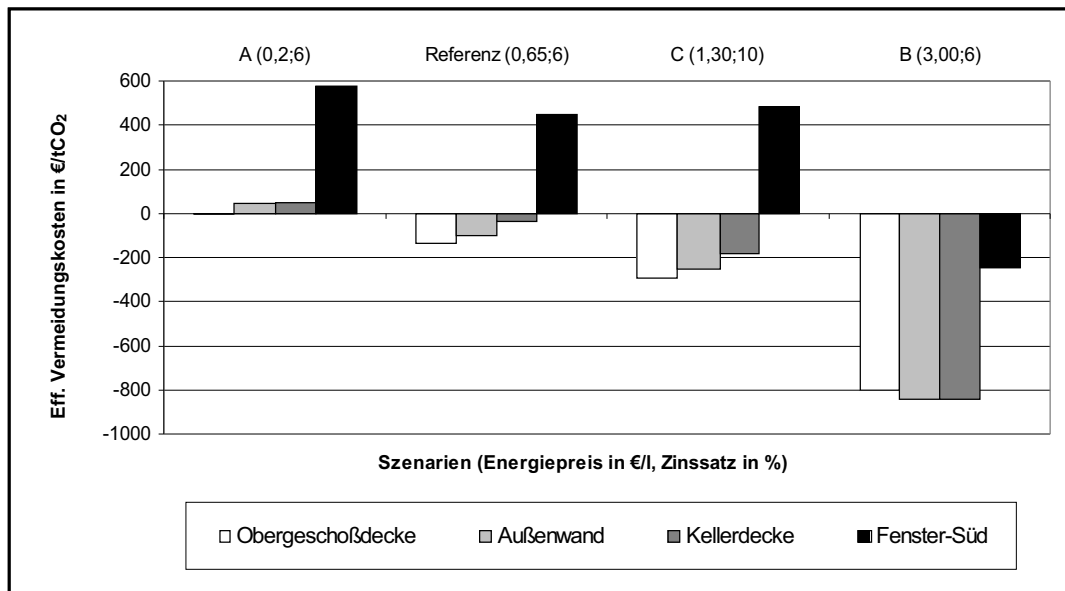


Abbildung 6.9: Einfluß des Energiepreises und des Zinses auf die eff. CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten am MFH\_E

Durch die Verdoppelung des Energiepreises können erhebliche Mehreinsparungen an Kosten erreicht werden. Eine Fenstermodernisierung bringt aber nach wie vor keinen Gewinn, sondern Kosten. Diese steigen sogar leicht an. Dies ist damit zu erklären, daß bei den hohen Investitionskosten nur vergleichsweise geringe Energieeinsparungen möglich sind. Bei einem höheren Zinssatz (hier 10%) wird der Einfluß der Mehraufwendungen an Kapital überproportional groß.

Noch stärker ist dieser Sachverhalt bei einem Energiepreis von 0,2 €/l und einem Zinssatz von 6% zu beobachten. Aufgrund des geringen Energiepreises sind die Erlöse aus der Energieeinsparung im Vergleich zu den Mehraufwendungen sehr gering.

Bei einer Anhebung des Energiepreises auf 3 €/l, erzielen alle Maßnahmen Erlöse. Es kommt zu einer leichten Verschiebung der Rangfolge der Maßnahmen.

Bei dem niedrigen Energiepreis von 0,2 €/l stellt sich heraus, daß die Wahl der maximalen Dämmstärke nicht immer sinnvoll ist. Bei der Dämmung der Obergeschoßdecke stellt sich heraus, daß eine Dämmstärke 12 cm wirtschaftlicher ist als im Referenzfall von 14 cm. Bei einem Energiepreis von 0,2 €/l üben die Kosten der Dämmung eben eine stärkere Rolle als die Erlöse aus den Energieeinsparungen aus.

#### 6.7.4.3 Einfluß des Zertifikatspreises

Um den Einfluß des Zertifikatspreises zu untersuchen, wurde er zwischen 10 und 40 €/tCO<sub>2</sub> variiert. Zum einen wird ein Fall dargestellt, bei dem der Zertifikatshandel die Maßnahmen lediglich wirtschaftlicher macht (MFH\_E), zum anderen der Fall, in dem Maßnahmen *erst durch* die Einführung eines Zertifikatshandels wirtschaftlich werden, am GMH\_E.

Die Variation des Zertifikatspreises führt im Falle des MFH\_E zu anderen Erlösen (Abbildung 6.10). Die Rangfolge der Maßnahmen, die vorher wirtschaftlich waren, bleibt erhalten. Im Fall der wirtschaftlichen Maßnahmen erhöhen sich die Erlöse um 24 bis 140%. Hier stellt der Erlös aus dem Zertifikatshandel nur einen Zugewinn dar, der kleiner ist als der Erlös aus den Energieeinsparungen. Die Fenstermodernisierung verursacht trotz Emissionshandel hohe Kosten und wird in der Abbildung nicht dargestellt.

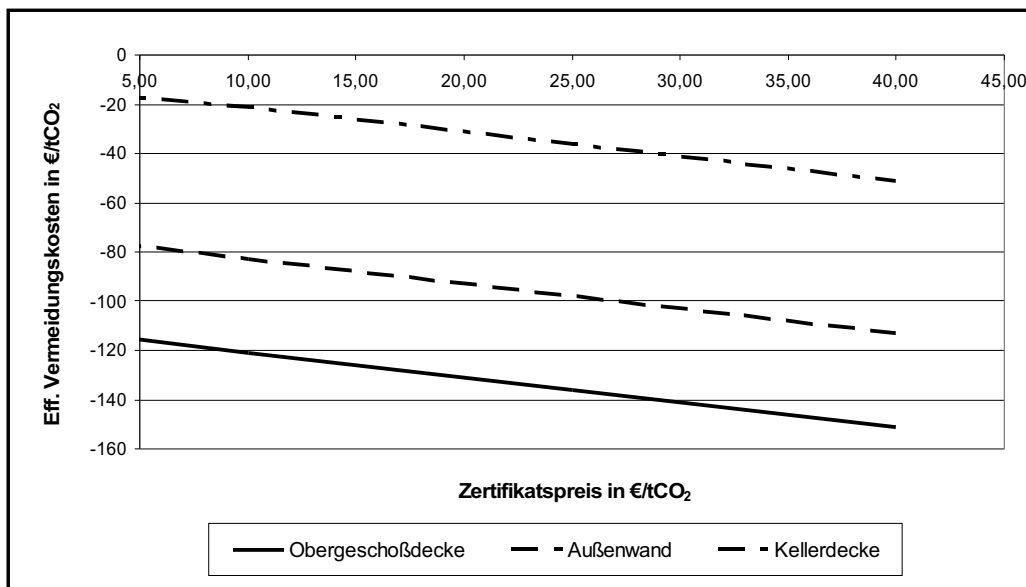


Abbildung 6.10: Einfluß des Zertifikatspreises auf die eff. CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten am MFH\_E

Anders stellt sich die Situation dar, wenn die Relevanz des Zertifikatshandels in Frage gestellt wird. Am Großmehrfamilienhaus GMH\_E (Baujahr 1958-68) wurden die effektiven CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten  $VK_{eff}$  mit und ohne Emissionshandel ermittelt (Tabelle 6.9 / Abbildung 6.11). Dabei wurde bei einem Emissionshandel ein Zertifikatspreis von 30 €/tCO<sub>2</sub> angesetzt.

Tabelle 6.9: Eff. CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten des Gebäudes GMH\_E mit und ohne CO<sub>2</sub>-Emissionshandel

Bauteil / $U_{alt}$ in [W/m <sup>2</sup> K]	Angaben zur Maßnahme	min. $VK_{eff}$ ohne Handel	min. $VK_{eff}$ mit Handel (30 €/tCO <sub>2</sub> )
Außenwand/ 1,30	14 cm Steinwolle	-84,2	-114,2
Fenster-Süd/ 5,20	2-fach WSG, PVC	23,6	-6,4
Fenster-West/Ost/ 5,20	2-fach WSG, PVC	25,0	-4,9
Fenster-Nord/ 5,20	2-fach WSG, PVC	25,7	-4,3
Kellerdecke/ 0,85	14 cm Glaswolle	29,5	-0,5
Obergeschoßdecke/ 0,82	14 cm Schaumglas	75,4	45,4

Bei fehlendem Emissionshandel für Wohngebäude, der jetzigen Situation, erzielt nur die Maßnahme Dämmung der Außenwände noch Erlöse. Alle anderen Maßnahmen wären mit Zusatzkosten verbunden. Existiert hingegen ein Emissionshandel für Wohngebäude und liegt der Zertifikatspreis bei 30 €/tCO<sub>2</sub>, werden fast alle Maßnahmen wirtschaftlich und erzielen Erlöse, ausgenommen die Dämmung der Obergeschoßdecke. Bedenkt man, daß Großmehrfamilienhäuser



meist von Immobilieninvestoren betrieben werden, wird die Relevanz eines solchen Zertifikatshandels deutlich, mit dem Kosten neutralisiert, Gewinne und womöglich höhere Mieteinnahmen realisiert werden.

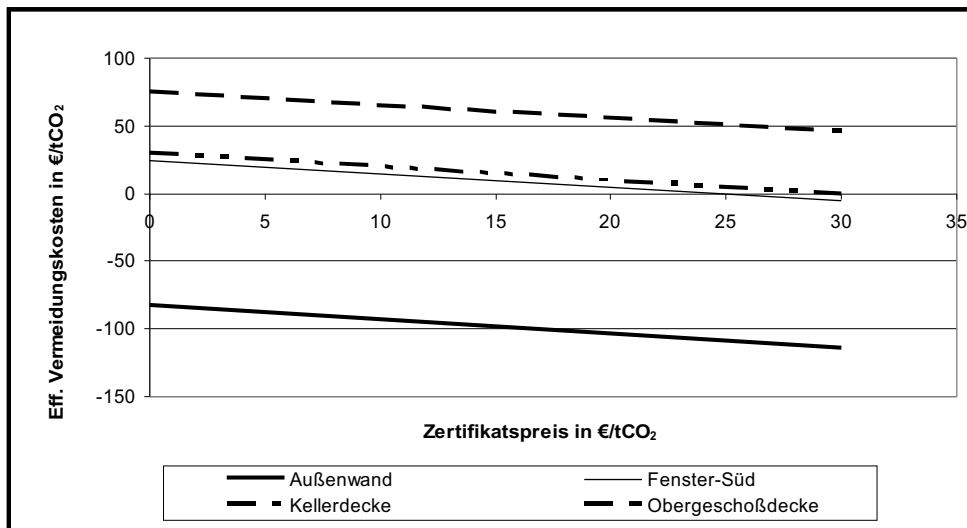


Abbildung 6.11: Eff. CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten am GMH\_E mit und ohne CO<sub>2</sub>-Emissionshandel

#### 6.7.4.4 Fazit

Die Wirtschaftlichkeit von Sanierungsmaßnahmen bei dem angestrebten Zertifikatshandel wird von mehreren Eingangsparametern beeinflusst. Den größten Einfluß übt der Energiepreis aus. Steigende Energiepreise führen zur gesteigerten Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen. Bei der gegenwärtigen Entwicklung der Energiepreise wird künftig die Motivation zu Sanierungsmaßnahmen begünstigt.

Der Zertifikatspreis stellt bei Gebäuden mit hohem Einsparpotential und gegebener Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen nur einen, wenn auch attraktiven, *Zugewinn* dar. Die Zertifikatspreisschwankungen üben daher bei den betrachteten Preisspannen keinen großen Einfluß aus. Allerdings zeigt sich, daß es Gebäude gibt, bei denen erst das Einführen eines Zertifikatshandels die wirtschaftliche Motivation bringt, eine Sanierungsmaßnahme am Gebäude durchzuführen. Insbesondere die Sanierung von Großmehrfamilienhäusern kann damit für Investoren wirtschaftlich reizvoll werden. Diese Erkenntnis dürfte sich noch verstärken, nimmt man nach baulichen Maßnahmen einen Umstieg auf eine effizientere Anlagentechnik mit emissionsarmen oder regenerativen Energieträgern vor.

#### 6.7.5 Wirtschaftliches CO<sub>2</sub>-Minderungspotential

Einzeln für die Gebäudetypen dargestellt, sind Unterschiede an der wirtschaftlich umsetzbaren Minderungsrate zu beobachten. Abbildung 6.12 stellt das wirtschaftliche Minderungspotential der vier Gebäudetypen bei baulichen Maßnahmen dar. Die Prozentangaben beziehen sich auf das technische Minderungspotential.

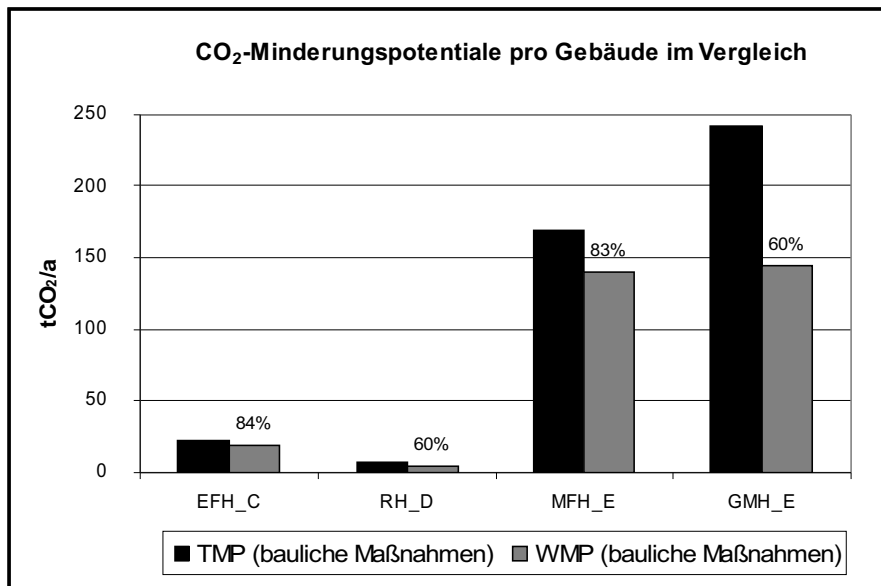


Abbildung 6.12: Technisches (TMP) und wirtschaftliches Minderungspotential (WMP) pro Gebäudetyp im Vergleich, ohne Berücksichtigung der Verteilung

Während die Gebäudetypen EFH\_E und MFH\_E ein wirtschaftliches Minderungspotential von 83 bzw. 84% aufweisen, beträgt dieses bei RH\_D und GMH\_E ca. 60%. Der deutliche Unterschied liegt u.a. am tendenziell günstigen A/V<sub>e</sub>-Verhältnis von Reihenhäusern und Großmehrfamilienhäusern. Um eine Aussage über das gesamte Minderungspotential zu gewinnen, werden im folgenden die Ergebnisse unter Berücksichtigung der bestehenden Verteilung der Gebäudeklassen in Abbildung 6.13 dargestellt.

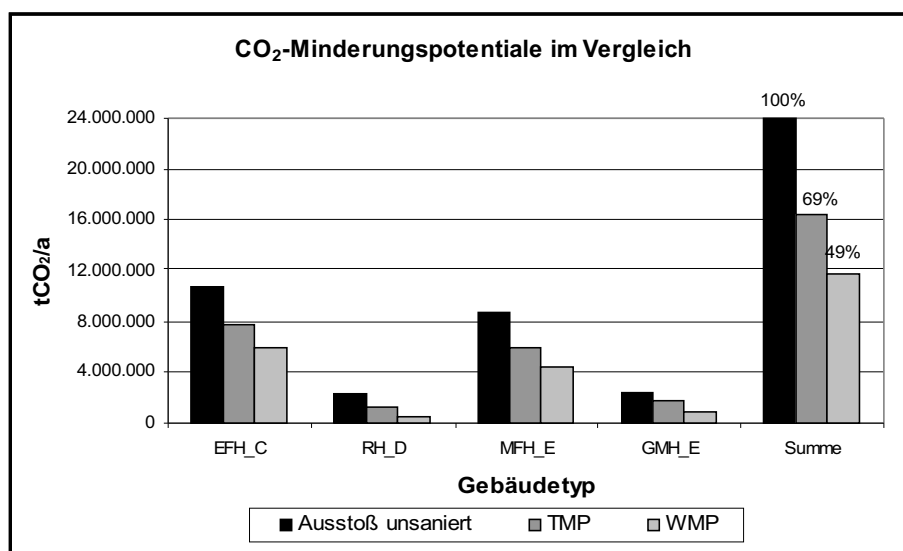


Abbildung 6.13: CO<sub>2</sub>-Ausstoß im unsanierten Zustand, technisches und wirtschaftliches Minderungspotential im Vergleich

Ausgehend vom CO<sub>2</sub>-Ausstoß der betrachteten Gebäude im unsanierten Zustand, werden das technische und wirtschaftliche Minderungspotential der jeweiligen Gebäudetypen in tCO<sub>2</sub>/a dargestellt. Die Ergebnisse für die Gesamtheit der betrachteten Gebäudetypen werden mit Prozentangaben ergänzt. Das wirtschaftliche Minderungspotential liegt, außer bei RH\_D mit ca. 21%, bei den restlichen Gebäudetypen bei über 50% des Ausgangsausstoßes. Die geringe Rate bei

RH\_D mag u.a. am tendenziell günstigen  $A/V_e$ -Verhältnis eines Reihenhauses liegen und an der Tatsache, daß die seitlichen Wände nicht an Außenluft angrenzen und damit die Transmissionswärmeverluste gering halten. Der geringere Ausstoß der GMH\_E gegenüber MFH\_E ist u.a. dadurch zu erklären, daß GMH\_E prozentual weniger vertreten sind.

Für die Gesamtheit aller vier Gebäude beträgt das durchschnittliche technische und wirtschaftliche Minderungspotential ca. 69% bzw. 49% (Abbildung 6.13).

Ca. 50% wirtschaftliches Minderungspotential wurde in [Enquête1995] geschätzt, allerdings für den gesamten Altbaubestand. Dies macht deutlich, welche Potentiale ein Emissionshandel freisetzen kann. Desweiteren wurde in dieser Arbeit das wirtschaftliche Minderungspotential ausschließlich für wärmeschutztechnische Maßnahmen ermittelt. Beim Hinzuziehen von apparativen Maßnahmen dürfte es sich erhöhen.

### 6.7.6 Fazit

Bundesweit und in absoluten Zahlen ist für die Gesamtheit der vier Gebäudetypen EFH\_C, RH\_D, MFH\_E und GMH\_E eine jährliche  $\text{CO}_2$ -Minderung von ca. 11,7 Mio.  $\text{tCO}_2$  und damit eine Halbierung des  $\text{CO}_2$ -Ausstoßes (im unsanierten Zustand ca. 24 Mio.  $\text{tCO}_2$ ) wirtschaftlich realisierbar. Gemessen an dem durchschnittlichen  $\text{CO}_2$ -Ausstoß des deutschen Gebäudesektors im Zeitraum 2000 bis 2002 von jährlich ca. 122 Mio.  $\text{tCO}_2$ , entspricht die hier berechnete und wirtschaftlich umsetzbare Minderung etwa 10%. Diese Zahl dürfte sich noch weiter erhöhen, wenn man zum einen alle vor 1978 errichteten Gebäude betrachtet, zum anderen apparative Maßnahmen hinzuzieht. Diese wurden am Gebäude GMH\_E exemplarisch demonstriert und zeigen ein vielversprechendes Minderungspotential, eine Steigerung des rein baulichen Minderungspotentials um fast 116%.

Eine Übertragung bzw. Hochrechnung des Ergebnisses auf den gesamten Altbaubestand ist hier nur bedingt möglich. Zum einen hängt das Minderungspotential stark vom energetischen Zustand der Gebäude ab, zum anderen sind diese zahlenmäßig zu unterschiedlich verteilt. Eine nennenswerte Erhöhung des hier errechneten und wirtschaftlich umsetzbaren Minderungspotentials ist jedoch sicherlich gegeben.

## 6.8 Abwicklung des $\text{CO}_2$ -Emissionshandels

### 6.8.1 Energieausweis als Überwachungsinstrument

Bei der Implementierung eines Zertifikatshandels im Gebäudebereich gilt es, eine Kontrollinstanz zu installieren. Diese sollte das Gebäude hinsichtlich des  $\text{CO}_2$ -Ausstoßes bewerten. Hierbei ist die verpflichtende Einführung eines Energieausweises nach EnEV für den Gebäudebestand eine günstige Option, ein in naher Zukunft ohnehin existierendes Dokument als Grundlage zu verwenden. Somit könnten Kosten und Aufwand zum Aufbau eines parallelen Systems vermieden werden. Ein Energieausweis würde neben seinen vorgesehenen Funktionen (Klassifizierung, Zertifizierung, Abrechnung oder gesetzlicher Nachweis) die Basis zur Teilnahme an einem Zertifikatshandel bilden. Um den Energieausweis bestmöglich an die Bedürfnisse eines Handels anzupassen, müssen die Vor- und Nachteile zwischen dem bedarfs- und verbrauchsorientierten Energieausweis abgewogen werden.

Vorteile des verbrauchsorientierten Ausweises sind die einfache Implementierung und damit die geringen Transaktionskosten sowie die Wiedergabe der tatsächlich verbrauchten Energie und der damit verbundenen  $\text{CO}_2$ -Emissionen. Der Nachweis einer nachhaltigen Einsparung ist jedoch in

diesem Fall eher schwierig, da das Nutzerverhalten ein von anderen Faktoren unabhängiges Kriterium ist und individuell sehr verschieden sein kann. Um eine nachhaltige Emissionsminderung zu erreichen, muß ein nutzerunabhängiges Nachweiskriterium eingesetzt werden.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Vergleichbarkeit der Gebäude. Daten zur Energieeffizienz und zur Umweltfreundlichkeit des Gebäudes wären bei einem verbrauchsorientierten Ausweis nicht möglich. Gerade bei einem CO<sub>2</sub>-Emissionshandel im Gebäudesektor kann die Energieeffizienz für Investoren die Grundlage für Investitionsentscheidungen bilden.

Der bedarfsorientierte Ausweis stellt daher die bessere Alternative dar. Die nachteiligen höheren Transaktionskosten können bei einem funktionierenden Markt in den Zertifikatspreis eingerechnet werden. Aus diesen Gründen erweist sich der Bedarfsausweis bei der Zuteilung von Zertifikaten als das geeignetere Überwachungsinstrument.

Es bleibt, Regelungen zur Durchführung, Erstellung und Kontrolle des Ausweises zu klären. Hinsichtlich der Kompetenzen und Interessen verschiedener Lobbys und Wirtschaftsbereiche gibt es viele potentielle Interessenten, die gerne die Erstellung eines solchen Ausweises übernehmen würden. Ingenieure, Architekten, Energieberater, Handwerker, die öffentliche Hand, das Bauamt oder auch Makler sind potentielle Interessengruppen. Die Bundesingenieurstkammer fordert die Einführung eines in der EnEV festgeschriebenen Prüfindgenieurs, der die komplexe Aufgabe der Erstellung eines Ausweises durchführt. Auch ein zertifizierter Handwerker und Schornsteinfeger könnten unmittelbar nach einer durchgeführten Maßnahme einen Nachweis erstellen. Problematisch wird in diesem Fall die Erstellung eines Ausweises, wenn kein bewertbarer baulicher Zustand vorliegt, etwa bei fehlenden Bauunterlagen und fehlenden belegbaren Nachweisen für durchgeführte Arbeiten. Unter solchen Umständen erscheinen Architekten und Ingenieure geeigneter zur sein, solche Ausweise zu erstellen und auch an Zuteilungsperioden angepasste Kontrollen durchzuführen. Den höheren Honoraren steht eine qualitativ hochwertige und belastbare Datengrundlage gegenüber.

Die erfaßten Daten eines Gebäudes sollen in einer zentralen Datenbank hinterlegt werden, um jederzeit einen Ist- / Sollabgleich durchführen zu können. Dazu bietet sich die Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHST) an.

Der Ausweis sollte zusätzlich zu dem in §13 der EnEV entworfenen Energiebedarfsausweis noch Angaben über die jährlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen, errechnet über den Jahresheizenergiebedarf und dem entsprechenden CO<sub>2</sub>-Äquivalent enthalten.

Desweiteren wäre es insbesondere für den Altbaubestand notwendig, die Berechnungen auf Grundlage der tatsächlichen Nutzfläche vorzunehmen. Der jetzige Ansatz nach der EnEV (Nutzfläche= 0,32\*beheiztes Volumen) führt zu geringeren als den tatsächlichen Emissionen.

### **6.8.2 Zuteilung von Zertifikaten**

Die Zertifikatzuteilung erfolgt im Rahmen des nationalen Allokationsplans. Nach [BodBut2006] kann die Allokation entweder proportional zu den Emissionen in einem Basiszeitraum, proportional zu Emissionsprognosen, entsprechend dem Minderungspotential oder pro Kopf erfolgen.

Für eine Zusammenlegung des industriellen und privaten Emissionshandels wäre eine ungleiche Behandlung bezüglich der Zertifikatzuteilung nicht sinnvoll. Da in der Industrie derzeit kostenlose Zertifikate zugeteilt werden, wird eine Auktion von Zertifikaten für Wohngebäude nicht weiter betrachtet. Die Verteilung von kostenlosen Zertifikaten stellt zwar eine Subvention dar, kann aber sinnvoll sein. Hauseigentümer, die frühzeitig in die energetische Sanierung ihres Gebäudes investieren, würden belohnt werden.

Eine Verteilung der Zertifikate nach historischen Emissionen im Sinne des Grandfathering-Prinzips läßt sich auch im Gebäudesektor realisieren. Als Referenzausstoß bieten sich die in dieser Arbeit ermittelten Werte im Ist-Zustand an. In diesem Fall beträgt der jährliche CO<sub>2</sub>-Ausstoß der vor 1978 errichteten Gebäude ca. 117,5 Mio. tCO<sub>2</sub>. Für die vier betrachteten Gebäude beträgt er ca. 24 Mio. tCO<sub>2</sub>.

Entsprechend einem definierten Minderungsziel  $x$  werden Zertifikate zugeteilt. Dabei sollte die Festlegung des Minderungszieles unter Berücksichtigung der wirtschaftlich umsetzbaren CO<sub>2</sub>-Minderung erfolgen.

$$(6.6) \quad \text{Anzahl Zertifikate} = CO_{2,ist} (1 - x)$$

Bei einem Minderungsziel von z.B. 10%, bezogen auf den CO<sub>2</sub>-Ausstoß der vor 1978 errichteten Gebäude im Istzustand von 117,5 Mio. tCO<sub>2</sub>, müßten kostenlose Zertifikate für ca. 105,8 Mio tCO<sub>2</sub>, den Haushalten nach reduziertem historischem Ausstoß zugeteilt werden.

Bei einer Zuteilung pro Kopf werden die Daten bezüglich Ausstoß und Minderungsziel zunächst wie bei der Zuteilung nach dem Grandfathering ermittelt. Die Verteilung wird hier pro Kopf (Bewohner) und nicht nach Haushalt bzw. Gebäude vorgenommen.

Die Anzahl der Bewohner in den vor 1978 errichteten Wohngebäuden läßt sich nach Formel (6.7) ermitteln. Dabei wird angenommen, daß pro Bewohner eine Wohnfläche von 41,6 m<sup>2</sup> zugewiesen werden kann [SBA2003].

$$(6.7) \quad N_B = \frac{A_W}{A_P}$$

$N_B$  Anzahl der Bewohner im Altbau in Person

$A_W$  gesamte Wohnfläche der Altbauten in m<sup>2</sup>

$A_P$  Fläche je Person, angenommen zu 41,6 m<sup>2</sup>

Bei 6 Millionen Gebäuden mit einer Wohnfläche von ca. 1,25 Milliarden m<sup>2</sup> ergibt sich die Anzahl der Bewohner zu ca. 30 Millionen. Eine gleichmäßige Zuteilung der oben ermittelten Anzahl der Zertifikate für 105,8 Mio. tCO<sub>2</sub> entspricht Zertifikaten für 3,5 tCO<sub>2</sub> pro Person.

Im Zuge der Debatte um die international gerechte Verteilung von gemeinsamen grenzüberschreitenden Ressourcen zwischen Industrie- und Entwicklungsländern wurde der Ansatz der Zuteilung pro Kopf diskutiert. Dadurch soll ein Einkommenstransfer zwischen Industrie- und Entwicklungsländern entstehen.

Nach [HelmSim2001] führt eine gerechte Pro-Kopf-Verteilung der Nutzungs- bzw. Verschmutzungsrechte früher oder später zu Kompensationszahlungen seitens der Industrieländer an die Entwicklungsländer, wovon beide gleichermaßen profitieren.

Unter sozialen Gesichtspunkten betrachtet, ist eine Zuteilung pro Kopf „gerecht“. Eigentümer mit großen Gebäuden und „nur“ zwei Bewohnern müßten mehr Zertifikate zukaufen oder in emissionsmindernde Sanierungsmaßnahmen an ihrem Gebäude investieren. Großfamilien, z.B. mit vielen Kindern, könnten ihre überschüssigen Zertifikate verkaufen oder ggf. finanziell belastende Sanierungsmaßnahmen umgehen. So überträgt eine Pro-Kopf-Verteilung die Sanierungsaufgaben auf finanziell besser gestellte Haushalte und schont sozial schwache. Letztere wohnen allerdings tendenziell in Mietverhältnissen. Ihnen obliegen die Durchführung von Sanierungsmaßnahmen nicht. Hier wird also nicht der Eigentümer unterstützt, sondern der Mieter subventioniert und ein mangelnder Anreiz für Sanierungsmaßnahmen durch Eigentümer verstärkt. Eine nach

Bewohnerverteilung und Eigentumsverhältnissen orientierte Zuteilung von Zertifikaten gestaltet sich aufgrund einer mangelnden belastbaren Datenbasis als schwierig.

Es wird daher vorgeschlagen, zunächst die Ausstattung mit Zertifikaten nach dem Grandfathering-Prinzip auf der Grundlage des tatsächlichen CO<sub>2</sub>-Ausstoßes der Gebäude vorzunehmen. Zu einem späteren Zeitpunkt besteht immer noch die Möglichkeit, auf eine Pro-Kopf-Verteilung umzusteigen. Vorteilhaft wäre dabei, daß aufgrund bekannter und hier erarbeiteter Daten zum Minderungspotential und optimalen effektiven CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten die Gebäude energetisch verbessert werden. Die Datengrundlage für eine spätere Pro-Kopf-Zuteilung kann im Zuge der Evaluation der Gebäude erarbeitet werden.

Desweiteren wird vorgeschlagen, die Allokationspläne nach den optimal wirtschaftlich umsetzbaren CO<sub>2</sub>-Minderungsmaßnahmen mit den geringsten effektiven CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten zu formulieren. Demnach sollte das Minderungsziel für vor 1978 errichtete Gebäude ca. 50% betragen. Ferner wird eine regelmäßige Überprüfung der Minderungsziele in den aufzustellenden Allokationsplänen empfohlen. Dies ist erforderlich, um den Einfluß des schwankenden Energiepreises und der Zinsentwicklung auf die Wirtschaftlichkeit der Sanierungsmaßnahmen zu berücksichtigen.

### **6.8.3 Ablauf des Handels**

Die CO<sub>2</sub>-Emissionsrechte der Industrie und Energieerzeuger werden an der European Energy Exchange (EEX) mit Sitz in Leipzig gehandelt. Vorausgegangen waren die LPX Leipzig Power Exchange mit Sitz in Leipzig und die European Energy Exchange mit Sitz in Frankfurt, die im Jahre 2002 zusammengelegt wurden. Für den Emissionshandel mit Zertifikaten des Wohngebäudesektors ist damit eine ideale Plattform gegeben. Eigentümer von Zertifikaten sollten an dem Handel an dieser Emissionsbörse i.d.R. über Zwischenhändler teilnehmen. Als Zwischenhändler bieten sich dabei Banken und Broker an.

In Anlehnung an die gewärtigte Praxis des Bundesumweltministeriums wird eine Handelsperiode für den Zeitraum 2008 bis 2012 festgelegt. Für diese Handelsperiode weist ein Allokationsplan die jährlichen Emissionsbudgets und damit auch die Minderungsziele aus. Innerhalb jeden Jahres können Haushalte Zertifikate erwerben, wenn sie diese Minderungsziele nicht erreichen können, bzw. verkaufen, wenn ihre Emissionen entsprechend weit unter den Vorgaben liegen. Übersteigt der Ausstoß am Ende der Handelsperiode den durch Zertifikate rechtmäßigen Ausstoß, kann dem Eigentümer entsprechend den Regelungen für die Industrie eine Strafe in Höhe von 100 €/tCO<sub>2</sub> auferlegt werden.

Dieser Handel wird an ein zentrales Handelsregister, z.B. der DEHST, gemeldet, das diese Informationen am Ende des Jahres bei der Überprüfung der Haushalte zur Verfügung stellt. Zu dieser Zeit findet eine Entwertung der Zertifikate des abgelaufenen Handelsjahres statt und die Ausgabe der neuen Zertifikate für das folgende Handelsjahr. Voraussetzung für den Allokationsplan ist die Erfassung der Bestandsdaten der Gebäude hinsichtlich Energieverbrauch, CO<sub>2</sub>-Ausstoß und Minderungspotential. Hier bietet sich der Energieausweis als Instrument an. Am Ende einer jeden Handelsperiode müssen die Ergebnisse der Gebäudeüberprüfungen und des Registers zum CO<sub>2</sub>-Handel in den Allokationsplan eingehen.

## **6.9 Fazit**

Die durchgeführten Untersuchungen und Analysen zeigen, daß die Implementierung des Emissionshandels im Gebäudesektor ein ökonomisch sinnvoller Schritt wäre. Es konnte gezeigt werden, daß die rechtlichen Rahmenbedingungen sowohl auf nationaler als auch europäischer

Ebene für ein solches Vorhaben bereits existieren bzw. diese durch leichte Modifikationen den Emissionshandel für Wohngebäude unterstützen würden. Die Vorschläge zur Zertifikatszuteilung und Überwachung sind realisierbar und die dafür nötigen Infrastrukturen sind bereits vorhanden oder bedürfen keines hohen finanziellen oder administrativen Aufwands für eine Anpassung.

Die Installation des Handels ist durch die Nutzung vorhandener Strukturen ohne größeren technischen und organisatorischen Aufwand möglich. Der Energieausweis nach der EnEV stellt eine geeignete Option dar, ein ohnehin erforderliches Überwachungssystem für Gebäude zu implementieren. Eine Integration des Handels in die European Energy Exchange Börse in Leipzig ist naheliegend. Gebäudeeigentümer könnten mit Hilfe einer Bank als Zwischenhändler Zertifikate kaufen und verkaufen.

Als wichtigste Erkenntnis der Untersuchungen ist die Wirtschaftlichkeit eines solchen Handels hervorzuheben. Eine Vielzahl von Maßnahmen, exemplarisch an ausgesuchten Gebäuden dargestellt, konnte erst durch den hier simulierten Emissionshandel als wirtschaftlich eingestuft werden. Die Einführung eines Emissionshandels kann in diesen Fällen den entscheidenden Anreiz liefern, Sanierungsmaßnahmen durchzuführen. Dies spricht für die Einführung eines Zertifikatsystems. Die hier durchgeführten Untersuchungen zum wirtschaftlichen Minderungspotential behandelten nur wärmeschutztechnische Maßnahmen und dies nur bei *vier* Gebäudetypen. Eine 10%ige Minderung des Gesamtaustoßes der Bundesrepublik im Gebäudebereich (ca. 122 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> jährlich) ist dennoch wirtschaftlich umsetzbar. Bei anschließenden apparativen Maßnahmen und der Erfassung aller vor 1978 errichteten Gebäude kann man von einem vielversprechenden Potential ausgehen. Eine Sensitivitätsanalyse zeigte unter anderem, daß auch ohne den Erlös aus einem Zertifikatsverkauf einige Sanierungsmaßnahmen rentabel zu realisieren sind. Dabei stellt der Energiepreis den entscheidenden Einflußfaktor mit der größten Hebelwirkung dar. In Anbetracht der Preisentwicklung im Energiemarkt kann ein zukünftiger höherer Energiepreis die Wirtschaftlichkeit des Zertifikatshandels noch mehr verstärken.

## 7 Konsequenzen für die Umsetzung

Im Kapitel 6 wurden Machbarkeit und Vorteile eines CO<sub>2</sub>-Handelssystems für den Wohngebäudesektor untersucht. Die organisatorischen und rechtlichen Rahmenbedingungen wurden geprüft. Insgesamt zeigte sich, daß ein CO<sub>2</sub>-Emissionshandel auf der Grundlage von Zertifikaten bei Wohngebäuden die wirtschaftliche Motivation unterstützen kann, emissionsmindernde Sanierungsmaßnahmen durchzuführen. Einige Maßnahmen werden sogar erst durch den Erlös aus dem Verkauf von CO<sub>2</sub>-Zertifikaten (bei einem Zertifikatspreis von 25 €/tCO<sub>2</sub>) wirtschaftlich lohnenswert. Bei anderen stellt dieser Erlös einen reinen Zugewinn dar. Im folgenden wird ein Vorschlag zur Umsetzung formuliert.

Der Einfluß des Zertifikatspreises auf die Wirtschaftlichkeit der einzelnen baulichen Maßnahmen wurde für die Gebäudetypen Mehrfamilienhaus (MFH\_E 1958-1968) und Großmehrfamilienhaus (GMH\_E 1958-1968) ermittelt.

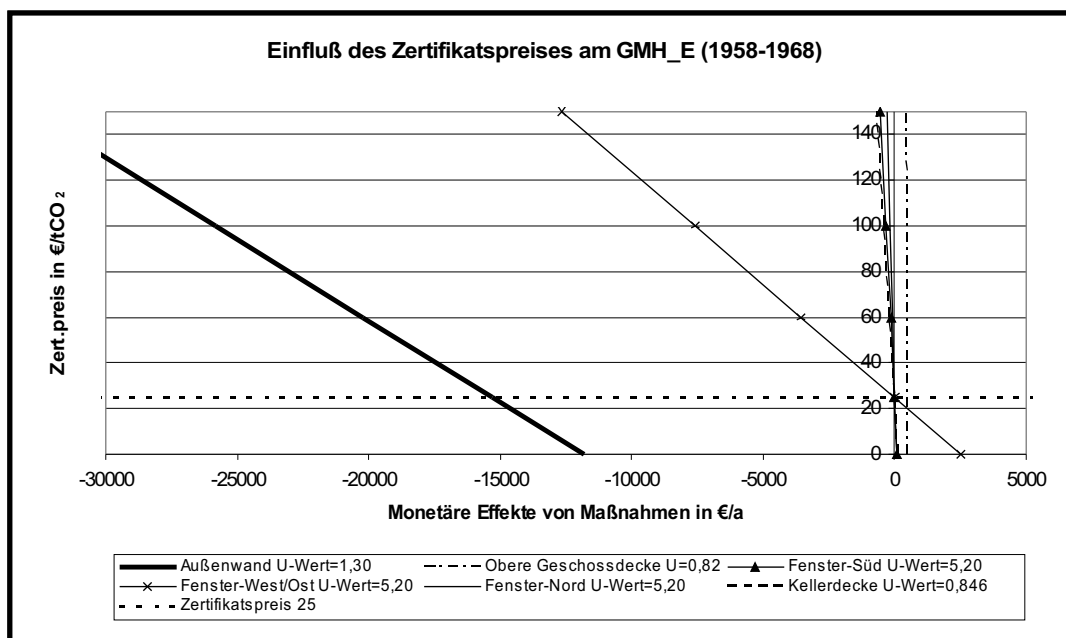


Abbildung 7.1: Einfluß des Zertifikatspreises auf die monetären Effekte für das Gebäude GMH\_E

Abbildung 7.1 zeigt die Ergebnisse für das GMH\_E. Bei der Durchführung der baulichen Sanierungsmaßnahmen wurde das wirtschaftlich optimale Minderungspotential verfolgt. In diesem Beispiel ist der EnEV-Standard erfüllt (Jahres-Primärenergiebedarf ca. 78 kWh/m<sup>2</sup>a bei einem EnEV-Grenzwert von 85 kWh/m<sup>2</sup>a). Auf der X-Achse sind die monetären Effekte der einzelnen Maßnahmen in €, auf der Y-Achse der Zertifikatspreis in €/tCO<sub>2</sub> abgetragen. Die Ergebnisspunkte auf der X-Achse entsprechen dem jährlichen Gewinn (negative Kosten) oder der jährlichen Zuzahlung (positive Kosten) bei einem Zertifikatspreis von 0 €/tCO<sub>2</sub>, also ohne einen Emissionshandel. Die Maßnahme Dämmung der Obergeschosßdecke (U=0,82 W/(m<sup>2</sup>K) im Ist-Zustand) stellt sich hier als unwirtschaftlich heraus. Auch ein Emissionshandel macht sie nicht wirtschaftlich. Würde der Eigentümer des GMH\_E diese Sanierungsmaßnahme durchführen, würde die jährliche finanzielle Belastung zwischen 509 € (bei fehlendem Emissionshandel) und 465 € (bei einem Zertifikatspreis von 150 €/tCO<sub>2</sub>) liegen.



Die Sanierungsmaßnahme Dämmung der Außenwand wird mit einem Zertifikatshandel wirtschaftlicher. Bereits ohne Handel kann ein Gewinn von ca. 11800 € jährlich erzielt werden. Bei einem Zertifikatspreis von 25 €/tCO<sub>2</sub> steigt der Gewinn auf ca. 15300 € jährlich. Zum Vergleich: Die jährlichen Heizkosten eines solchen Gebäudes mit 38 Wohneinheiten und Energiekosten von 11 Cent/kWh<sub>RW</sub> liegen bei ca. 65.000 €. Die Differenz von 11800 bzw. 15300 € Entlastung entspricht etwa 18 bzw. 23% der Heizkosten. Eine zusätzliche Förderung dieser Sanierungsmaßnahmen ist ökonomisch aus der Sicht des Förderers nicht sinnvoll. Währenddessen neutralisieren sich die jährlichen Zuzahlungen bei den Maßnahmen Fenstermodernisierung und Dämmung der Kellerdecke bereits bei einem Preis von 25 €/tCO<sub>2</sub>.

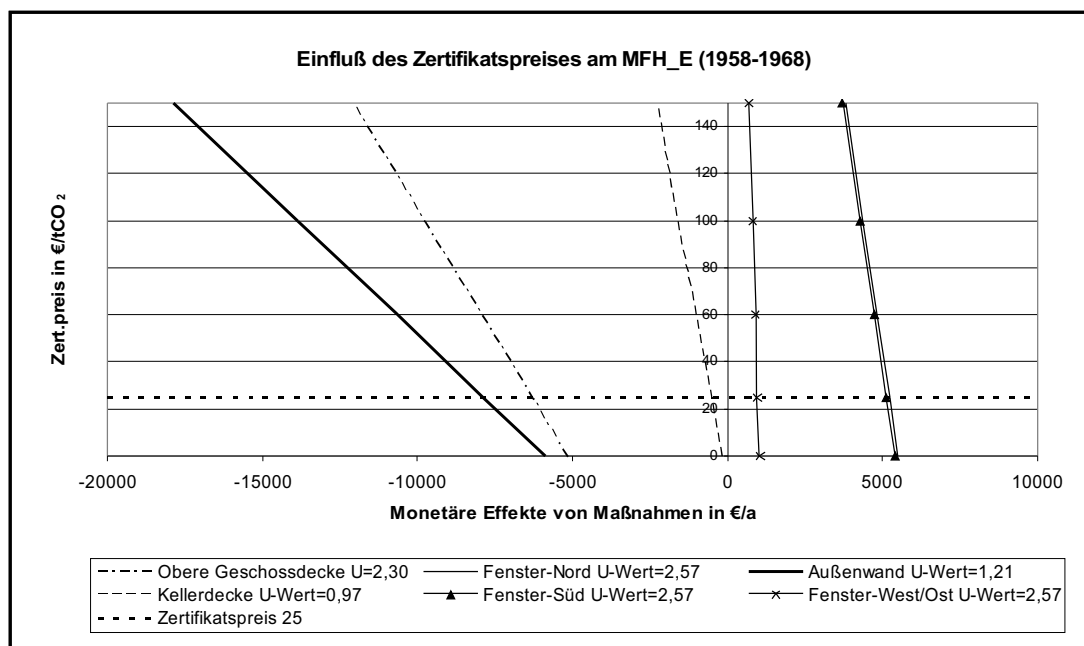


Abbildung 7.2: Einfluß des Zertifikatspreises auf die monetären Effekte für das Gebäude MFH\_E

In Abbildung 7.2 sind die Ergebnisse des Gebäudes MFH\_E (1958-1968) dargestellt. Auch hier sind ähnliche Beobachtungen zu machen. Beispielsweise erhöhen sich die Gewinne der Außenwandsanierung bei einem Zertifikatspreis von 25 €/CO<sub>2</sub> um ca. 2000 € auf 7800 €/Jahr, bei der Sanierung der Obergeschoßdecke um 1150 € auf ca. 6200 €/Jahr. Die Fenstermodernisierungen können sich nicht neutralisieren.

Nach diesen Erkenntnissen wäre es zu empfehlen, die finanzielle Förderung für die Maßnahmen einzusparen, die mit einem Zertifikatshandel lohnenswert oder noch attraktiver werden. Für die restlichen Maßnahmen könnte eine konzentrierte Förderung eher zum Ziel führen. Insbesondere könnte so eine zusätzliche Minderung über die rein wirtschaftliche hinaus erreicht werden. Zwar sollte die Emissionsminderung dort verfolgt werden, wo sie am ökonomischsten ist; an dieser Stelle sind aber auch andere Aspekte zu berücksichtigen. Denkmalschutzbedingt ist eine Fenstermodernisierung bei Fachwerkhäusern sehr teuer. Letztere sollten aus baukulturellen Gründen geschützt und daher weiterhin gefördert werden. Desweiteren sind bauphysikalische Aspekte zu bedenken. So entstehen am Übergangsbereich zwischen schlecht gedämmten Fenstern und gut gedämmten Wänden Wärmebrücken und womöglich Schimmel. Daher sollte dafür Sorge getragen werden, daß trotz höherer Kosten Fenstermodernisierungen wirtschaftlich tragbar bleiben.

Die Untersuchung läßt sich prinzipiell auf alle Wohngebäudearten der Deutschen Typologie übertragen und als Leitfaden dienen.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein ökologisch und ökonomisch tragfähiges Konzept zur Umsetzung emissionsmindernder Sanierungsmaßnahmen an Wohngebäuden entwickelt.

Motiviert wird dies durch eine Ausgangssituation, die gekennzeichnet ist durch die wachsende Bedeutung des Klimaschutzes und damit einhergehend der notwendigen nachhaltigen Reduzierung der Emissionen klimaschädlicher Gase.

Die Reduzierung klimaschädlicher Gase, ausgedrückt in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten, wird bisher für ausgesuchte Bereiche der Wirtschaft über einen Emissionshandel auf der Grundlage von CO<sub>2</sub>-Zertifikaten abgewickelt. In dieser Arbeit wurde das Instrument des Emissionshandels für den Wohngebäudesektor weiterentwickelt. Ein solcher Emissionshandel ist an Voraussetzungen geknüpft, die hier überprüft wurden.

Im Kapitel 1 wurde die Bedeutung des Wohnsektors und insbesondere des Altbaubestandes für das Erreichen von CO<sub>2</sub>-Minderungszielen aufgezeigt. Die privaten Haushalte verursachen ca. 30% des Gesamtenergieverbrauchs in der Bundesrepublik und ca. 13% der CO<sub>2</sub>-Emissionen. 90 % der gebäudebezogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen fallen dabei im Altbaubestand an. Die bisherigen Instrumente erscheinen dabei als nicht geeignet, die möglichen CO<sub>2</sub>-Emissionsminderungen in einem gegebenen Zeitrahmen zu verwirklichen. Die Energieeinsparverordnung (EnEV) und das KfW-CO<sub>2</sub>-Gebäudesanierungsprogramm, als wesentliche Elemente des Nationalen Klimaschutzprogrammes, mobilisieren nur unzureichend die Minderungspotentiale im Gebäudesektor. Die EnEV sieht bei ihren Anforderungen an bestehende Gebäude viele Befreiungsmöglichkeiten vor. Wie Studien belegen, bleibt auch das KfW-CO<sub>2</sub>-Gebäudesanierungsprogramm von möglichen Zielwerten weit entfernt.

Dies macht neue Ansätze notwendig. Im Kapitel 2 wurde deshalb der Emissionshandel für Wohngebäude als neuer Ansatz vorgeschlagen. Die Untersuchung dieses Ansatzes auf die ökologische und ökonomische Tragfähigkeit wird als Ziel dieser Arbeit formuliert.

Da es sich um eine interdisziplinäre Arbeit handelt, wurden im Kapitel 3 zur leichteren Orientierung relevante Grundlagen der Bauphysik, der Betriebswirtschaft, der Umweltökonomie, sowie die Anforderungen und Instrumente der EnEV erläutert.

Kapitel 4 schafft die Voraussetzung, Sanierungsmaßnahmen ökologisch bewerten zu können. Dafür ist eine ganzheitliche Betrachtung erforderlich, die auch den Herstellungsprozeß, der bei einer Sanierungsmaßnahme eingesetzten Stoffe, Produkte und Anlagen und die betriebsbedingten Umweltbelastungen berücksichtigt. Deshalb wurden die CO<sub>2</sub>-Emissionen in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten und der Kumulierte Energieaufwand (KEA) der Herstellungsprozesse und der Betriebsphase (bei Anlagen) ermittelt. Diese Daten werden gebäudeunabhängig für typische Sanierungsmaßnahmen in den sog. Datenblättern zusammengefaßt. Unter dem Begriff Vorketten gehen diese Daten in die Analysen der nachfolgenden Kapitel ein.

Kapitel 5 behandelt die spezifischen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten baulicher und apparativer Maßnahmen auf breiter Basis und liefert so Orientierungsgrößen für deren Beurteilung hinsichtlich ihrer ökologischen Effektivität und wirtschaftlichen Effizienz. Anzustreben ist dabei ein Optimum an wirtschaftlicher Effizienz, das die ökologische Motivation der Maßnahme nicht verletzt.

Da eine effizientere Anlagentechnik ein höheres CO<sub>2</sub>-Minderungspotential hat, hängen die spezifischen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten einer Maßnahme von der Bestandstechnik ab. Bei einer üblichen Anlagentechnik sind deshalb i.d.R. alle baulichen Sanierungsmaßnahmen ökologisch

sinnvoll, denn die erzielten CO<sub>2</sub>-Einsparungen überwiegen die Vorketten. Effektive CO<sub>2</sub>-Minderungen sind realisierbar.

Interessanterweise ändert sich dies, wenn die bestehenden Anlagen regenerative Energieträger wie Holz verwenden. Da die klimarelevanten Emissionen schon in den Altanlagen gering sind, ist auch nach einer baulichen Sanierung wenig an klimaschädlichen Emissionen zu mindern. Dies hat zur Folge, daß die Vorketten ggf. gar nicht oder nur marginal kompensiert werden können. Diese mangelnde ökologische Effektivität und ökonomische Effizienz spiegelt sich klar in den spezifischen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten wider. Die spezifischen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten wurden ebenfalls unabhängig vom Gebäudetyp ermittelt und sind deshalb auf alle Gebäudetypen anwendbar. Sie sind damit ein geeignetes Instrument, objektiv die optimalen Sanierungsmaßnahmen für ein Gebäude zu bestimmen.

Darüberhins lassen sich die ermittelten spezifischen CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten einfach für eine gewünschte Kombination von Kreditzins und Kreditlaufzeit umrechnen, um so der ggf. zeitlich gedehnten Finanzierung Rechnung zu tragen.

Kapitel 6 beschäftigt sich mit dem Konzept eines CO<sub>2</sub>-Emissionshandels für Wohngebäude im Bestand. Dabei werden die gebäudeunabhängigen Ergebnisse aus Kapitel 4 und Kapitel 5 auf konkrete Gebäude der Deutschen Gebäudetypologie angewandt. Aus der großen Vielzahl von Sanierungsszenarien wurde das mit effizienten und ökologischen Sanierungsmaßnahmen technisch erreichbare CO<sub>2</sub>-Minderungspotential im Altbaubestand ermittelt. Erst mit dieser Information lassen sich CO<sub>2</sub>-Minderungsziele sinnvoll vorgeben.

Das technisch mögliche CO<sub>2</sub>-Minderungspotential aller betrachteten Gebäude (vor 1978) beträgt bei baulichen Maßnahmen ca. 67%, bei Hinzuziehen von apparativen Maßnahmen sogar 80% des Ausstoßes im unsanierten Zustand (ca. 117,5 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>). Bei der Ermittlung des technischen CO<sub>2</sub>-Minderungspotentials wird der EnEV-Standard von den Mehrfamilien- und Großmehrfamilienhäusern erreicht. Bei Einfamilien- und Reihenhäusern wird der Grenzwert um ca. 15 bis 20% überschritten.

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse der Sanierungsmaßnahmen wurde auf Basis effektiver CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten durchgeführt. Im Gegensatz zu den spezifischen Vermeidungskosten in Kapitel 5 berücksichtigen sie auch Erlöse aus Energieeinsparungen und Zertifikatsverkäufen.

An vier Gebäudetypen wurde exemplarisch eine Wirtschaftlichkeitsanalyse von baulichen Sanierungsmaßnahmen durchgeführt. Es wurden folgende Gebäudetypen betrachtet: die Einfamilienhäuser Typ C Baujahr 1919-1948 (EFH\_C), die Reihenhäuser Typ D 1949-1957 (RH\_D), die Mehrfamilien- und Großmehrfamilienhäuser Typ E Baujahr 1958-1968 (MFH\_E, GMH\_E). Desweiteren wurden am GMH\_E auch apparative Sanierungsmaßnahmen untersucht. Diese Untersuchungen zeigen, daß bereits bei dem hier zugrunde gelegten Zertifikatspreis von 25 €/tCO<sub>2</sub> bestimmte Sanierungsmaßnahmen ökonomisch lohnenswert werden. Andere Maßnahmen sind wegen ihres hohen Energieeinspareffektes per se schon ökonomisch. Hier stellen Zertifikatserlöse einen Zugewinn dar. Für alle vier Gebäudetypen zusammen lassen sich ca. 50% des Ist-Austoßes (von ca. 24 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>) wirtschaftlich mindern. Zum Vergleich, das technische Minderungspotential beträgt für diese vier Gebäudetypen 69%.

Eine Sensitivitätsanalyse zeigt, daß bei einem Zertifikatspreisniveau von ca. 25 €/tCO<sub>2</sub> die Energiepreise einen stärkeren Einfluß auf die effektiven CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten haben. Dies mag auf den ersten Blick unbefriedigend wirken, reduziert aber die Gefahr eines „Übersteuerns“ bei der Einführung des Zertifikatshandels für den Wohngebäudesektor.

Die Einführung des Zertifikatshandels bedarf einer rechtlichen Basis, die diskutiert wurde.

Auf europäischer Ebene werden von der „Richtlinie 2002/91/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden“ Anforderungen an die Mitgliedsstaaten u.a. hinsichtlich ihrer Programme zur Verbesserung der Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden und der Steuerung der Energienachfrage formuliert. Zwar sieht diese Richtlinie keinen Emissionshandel für den Gebäudesektor vor, läßt aber andere als die in der Richtlinie genannten Instrumente und Maßnahmen zu. Auch die „Richtlinie 2003/87/EG des Europäischen Parlaments über ein System für den Handel mit den Treibhausemissionszertifikaten in der Gemeinschaft“ hindert die Mitgliedstaaten nicht daran, nationale Handelssysteme zur Regelung der Treibhausgasemissionen als die in den Richtlinien vorgesehenen einzurichten. Die Einführung eines Emissionshandels mit dem Ziel der CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung im Gebäudesektor auf nationaler Ebene würde also auch von der Europäischen Gemeinschaft unterstützt.

Auf nationaler Ebene wäre die rechtliche Einbindung eines Emissionshandels für private Haushalte durch die Erweiterung des Anwendungsbereichs des Treibhaus-Emissionshandels-gesetzes (TEHG) denkbar. Auf diesem basiert bereits der Emissionshandel im Industriesektor.

Diskutiert wurde auch die Konfliktsituation mit dem Bestandsschutz bei der Einführung eines Emissionshandel für private Wohngebäude. Bereits auf Grundlage geltender Gesetze ist eine Verletzung des Bestandsschutzes bei nachgewiesener Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen allerdings nicht mehr gegeben. Die Möglichkeit einer gesetzlichen Verpflichtung zu Sanierungsmaßnahmen auf der Grundlage des Wirtschaftlichkeitsgrundsatzes (§5 EnEG) besteht. Die Anreize für die Vermieter sind bereits gesetzlich gesichert. Vermieter dürfen nach §3 MHG die Miete erhöhen, wenn sie Investitionen in energiesparende Sanierungsmaßnahmen tätigen; Mieter müssen nach §554 BGB solche Maßnahmen dulden. Das Zertifikatssystem bietet somit auch ein Instrument, rechtlich verbindliche Minderungsziele im Wohngebäude-bestand durchzusetzen.

Die Durchführung des Handels orientiert sich an der Vorgehensweise, die bereits für die Industrie eingeführt wurde. Dafür wird für jeden Teilnehmer am Handel (Gebäude- oder Wohnungseigentümer) die für ein Jahr erlaubte Menge an Emissionen festgelegt und eine entsprechende Menge an Zertifikaten zugeteilt. Je nach erwarteter tatsächlicher Emissionsmenge kann der Teilnehmer dann Zertifikate dazu kaufen oder verkaufen. Am Ende des Jahres sind die tatsächlichen Emissionen festzustellen und zu überprüfen, ob diese durch eine entsprechende Menge an Zertifikaten gedeckt wurden, also rechtmäßig waren. Ist dies nicht der Fall werden Sanktionen gegen den Teilnehmer verhängt. Mit Beginn eines neuen Bilanzierungsjahres werden neue Zertifikate zugeteilt. Daß ungenutzte Zertifikate am Ende eines Jahres verfallen, muß nicht zwingend so gehandhabt werden.

Um den Handel in dieser Weise führen zu können, muß insbesondere die Zuteilung und die Überprüfung geregelt werden. Zumindest bei der Einführung eines Emissionshandels ist einer Zuteilung nach dem Grandfathering-Prinzip den Vorzug zu geben, da die Alternativen einen erheblich höheren Aufwand erfordern. Dieser Modus kann in folgenden Handelsperioden ggf. angepasst oder geändert werden.

Die Zuteilung und die Überprüfung setzen Informationen über einen akzeptablen Energie- bzw. Emissionsbedarf und die tatsächlichen Emissionen eines Gebäudes voraus. Erstere könnten durch den Energieausweis festgehalten werden, der ohnehin von der für 2006 angekündigten Neufassung der Energieeinsparverordnung für den Gebäudebestand verpflichtend vorgesehen wird. Für die Überprüfung können die Rechnungen der Energieversorger herangezogen werden.

Um den Zielen einer nachhaltigen Emissionsminderung gerecht zu werden, ist es zwingend erforderlich einen *bedarfsorientierten* Energieausweis für alle Gebäude verbindlich zu machen.

Dieser bietet eine Basis für eine nachhaltige Emissionsminderung. Nur mit diesem ist der belastbare Nachweis einer langfristigen Emissionsminderung möglich. Mit ihm wäre eine Vergleichbarkeit der Gebäude hinsichtlich ihres Energie- und Emissionsverhalten möglich, was für die Immobilienwirtschaft von Bedeutung ist. Die höheren Kosten der Erstellung eines bedarfsorientierten Energieausweises dürften bei einem funktionierenden Handel keine Schwierigkeit darstellen.

Für den Emissionshandel des Wohngebäudesektors ist die European Energy Exchange (EEX) mit Sitz in Leipzig eine ideale Plattform. Eigentümer von Zertifikaten sollten individuell an dem Handel an dieser Emissionsbörse, i.d.R. über Zwischenhändler teilnehmen. Als Zwischenhändler bieten sich dabei Banken und Broker an.

In Kapitel 7 wird ein Vorschlag zur Umsetzung gemacht. So wäre für wirtschaftliche Sanierungsmaßnahmen zu überprüfen, ob eine weitere Förderung noch angemessen ist. Es wird empfohlen, diese Mittel zur Förderung von Sanierungsmaßnahmen einzusetzen, deren Wirtschaftlichkeit beim aktuellen Energie- und Zertifikatspreis nicht gegeben ist. Diese Förderung würde damit eine Emissionsminderung über das wirtschaftlich erreichbare Niveau von 49% hinaus bewirken und dabei die Berücksichtigung anderer Aspekte wie die der Denkmalschutzpflege und der Bauphysik ermöglichen.

Nach [NAP2006] lagen die Sektoren Verkehr, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen und private Haushalte im Jahre 2004 bereits mit 8 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> unter dem im Rahmen des NAP 2005-2007 festgelegten Zielwert für die Periode 2008-2012 von 349 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>. Deshalb werden wohl keine weiteren Anstrengungen in diesen Sektoren für notwendig erachtet.

Die Bedeutung des Klimaschutzes wird allerdings zunehmen. Deshalb sollten keine Chancen zur CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung vertan werden. Wie hier gezeigt, ist eine 10% Minderung der Emissionen im Altbaubestand, bezogen auf den Ausstoß von 2004, allein durch *bauliche* Maßnahmen von nur vier Gebäudetypen bei einem realistischen Zertifikatspreis wirtschaftlich umsetzbar. Umgerechnet auf die Gesamtemissionen der Bundesrepublik im Wohngebäudebereich entspricht das knapp der Hälfte der Vorgaben für die Industrie und sollte deshalb nicht gering geschätzt werden. Bei anschließenden apparativen Maßnahmen und der Erfassung aller vor 1978 errichteten Gebäude kann man von einem viel versprechenden Potential ausgehen.

In dieser Arbeit wurde ein Emissionshandel für den Wohngebäudebestand vorgeschlagen unter Bezug auf den bestehenden Handel im Industriesektor. Man kann diesen Sachverhalt auch so interpretieren, daß z.Z. die Verursacher von Emissionen noch explizit aufgezählt werden müssen, die man zur Emissionsminderung verpflichten will. Denkbar wäre hingegen auch ein konsequent ganzheitlicher Zugang zum Problem der CO<sub>2</sub>-Emissionen, indem man den externen Effekt „CO<sub>2</sub>-Emissionen“ prinzipiell zu einem internen Effekt macht. Es würde nicht mehr argumentiert, wer auch noch sparen muß, sondern nur noch, ob sich der Einzelne die Emissionen für eine Ware leisten will, so wie es heute schon beim Energieverbrauch ist. Für den Klimaschutz wäre das ein Gewinn.

*In devising and choosing between social arrangements we should have regard for the total effect. This, above all, is the change in approach which I am advocating.*

*Ronald H. Coase, Nobelpreisträger 1991*

## Literaturverzeichnis

[Bardt2006] Bardt, H.: Institut der deutschen Wirtschaft Köln, Vorabdruck aus IW Trends 33. Jahrgang, Heft 3/2006, Juli 2006

[BGB1998] Bürgerliches Gesetzbuch, RGBI 1896, 195, Textnachweis Geltung ab: 01.01.1980, letzte Änderung 19.04.2006

[BMU2002] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 3. Bericht der Regierung der Bundesrepublik Deutschland nach dem Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen, Berlin 2002

[BMU2006] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Entwicklung der Erneuerbaren Energien 2005, aktueller Sachstand, Stand Mai 2006

[BMU079/06] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Pressemitteilung Nr. 079/06 des Bundesministers Sigmar Gabriel, „Deutschland bleibt Vorreiter beim Klimaschutz / Bundesministerium legt Entwurf für Zuteilung von CO<sub>2</sub>-Zertifikaten“, Berlin, 2006

[BMWI/BMVBS2006] Das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie und das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Gemeinsame Pressemitteilung Nr. 112/2006 „Tiefensee und Glos geben Startschuß für Energieausweise im Gebäudebestand, 07. April 2006

[BMU/IFEU2005] Institut für Energie- und Umweltforschung in Heidelberg, Beitrag der Abfallwirtschaft zur nachhaltigen Entwicklung in Deutschland / Teil Siedlungsabfall, im Auftrag des BMU und UBA, veröffentlicht in Umwelt Nr. 10 / 2004 des BMU, Sonderteil, Heidelberg/Berlin, 2005

[Baukosten2000] Schmitz, H., Krings, E., Dahlhaus, U., Meisel, U.: Baukosten 2000, Instandsetzung, Sanierung, Modernisierung, Umnutzung, Verlag für Wissenschaft und Verwaltung Hubert Wingen, Essen, 1999

[BaukostenAtlas2005] Mandl, W.: Baukosten-Atlas, Neubau-Wohnungsbau; Kostenkennwerte für alle Gebäudetypen im direkten Vergleich; detaillierte Kennzahlen von Bauelementen nach DIN 276; ausführliche Lebenszyklusdaten von Bauteilen, WEKA Media, Kissing, 2005

[BVerfG,1 BvR 151/99] Bundesverfassungsgericht, Beschluß vom 24.07.2000, Absatz-Nr. (1-10), URL:[http://www.bverfg.de/entscheidungen/rk20000724\\_1bvr015199.html](http://www.bverfg.de/entscheidungen/rk20000724_1bvr015199.html), Bonn, 2006

[Böhning2005] Böhning, J.: Altbaumodernisierung im Detail, Konstruktionsnempfehlungen, 5. Auflage, Müller Verlag, Köln 2005

- [BodBut2006] Bode, S., Buntzengeier, S.: Zur kostenlosen Allokation von Emissionsrechten in Deutschland, Hamburgerische Welt-wirtschafts-Archiv, Hamburg, 2003  
URL:[http://www.hwwa.de/Forschung/Klimapolitik/docs/Archiv/Bode\\_Buntzengeier\\_2003.pdf](http://www.hwwa.de/Forschung/Klimapolitik/docs/Archiv/Bode_Buntzengeier_2003.pdf)
- [Borsch2001] Borsch, P.: Welche Emissionen von Schwefeldioxid, Stickoxiden und Staub entstehen bei der Stromerzeugung?, 10.09.2001, URL: <http://www.energiefakten.de>
- [Bund2006] Der Deutsche Bundestag: Konsultationspapier zur Entwicklung eines Instruments zur Förderung der erneuerbaren Energien im Wärmemarkt, Berlin, 24.05.2006
- [Coase1960] Coase, R. H.: Artikel „The Problem auf Social Cost“, Journal of Law and Economics, Vol. 3, S. 1–44., Oktober 1960
- [Dena2006] Deutsche Energie-Agentur GmbH, URL:<http://www.zukunft-haus.info/page/index.php?id=1763>, abgerufen am 19.07.2006
- [DIN V 4701-10] DIN V 4701-10: Energetische Bewertung heiz- und raumluftechnischer Anlagen - Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung, Ausgabe: 2003-08
- [DLR/ISI2006] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung: Externe Kosten der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien im Vergleich zur Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern, Stuttgart/Karlsruhe, April 2006
- [EbEiFei1992] Ebel, W., Eicke, W., Feist, W.: Hohe Einsparpotentiale bei bestehenden Gebäuden. Bauphysik, Jg. 14, Heft 3, Berlin, 1992
- [Ecologic2005] Institut für Internationale und Europäische Umweltpolitik gGmbH, Stoffpreiseffekte des Emissionshandels - Bewertung und Lösungsansätze aus ökonomischer Sicht, Studie im Auftrag von Greenpeace, Berlin, November 2005
- [EEG2004] Gesetz über den Vorrang Erneuerbarer Energien, BGBl I 2004, 1918, 21. Juli 2004
- [EEX2006] European Energy Exchange, Leipzig, 2006, URL:<http://www.eex.de>
- [EG2002] Richtlinie 2002/91/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden, 16. Dezember 2002
- [EG2003] Richtlinie 2003/87/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über ein System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten in der Gemeinschaft und zur Änderung der Richtlinie 96/61/EG des Rates, 13. Oktober 2003
- [EnEG1976] Gesetz zur Einsparung von Energie in Gebäuden, BGBl I 1976, Bundesregierung, 22. Juli 1976

[EnEV2004] Energieeinsparverordnung: Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparenden Anlagentechnik bei Gebäuden in der Fassung vom 08. Dezember 2004, Bundesgesetzblatt I S. 3146

[EN ISO 14040] Ökobilanz – Umweltmanagement – Prinzipien und allgemeine Anforderungen, Fassung 1997

[Enquête1995] Enquête-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ des 12. Deutschen Bundestages, Mehr Zukunft für die Erde, Bonn, 1995

[Enquête2002] Enquête-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung“ des 14. Deutschen Bundestages, Berlin 2002

[EnsDieHin2005] Ensling, A., Diefenbach, N., Hinz, E.: Institut für Wohnen und Umwelt, Endbericht (21.05.2005) vom Forschungsprojekt Integriertes Klimaschutzprogramm INKLIM 2012, im Auftrag vom Hessischen Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz, Darmstadt 2005, noch nicht veröffentlicht

[EyeRein2000] Eyerer, P., Reinhard, H.-W.: Ökologische Bilanzierung von Baustoffen und Gebäuden - Wege zu einer ganzheitlichen Betrachtung, Birkhäuser Verlag, Zürich, 2000

[Fees1997] Fees, E.: Mikroökonomie, 2. Auflage, Franz Vahlen Verlag, München, 1997

[Filippi1998] Filippi, M.: Nachhaltige Waldbewirtschaftung – Leitbild für eine ökonomische und ökologische Ressourcennutzung, in: Umwelt: Landschaft, Klima – der Themenband, Reichling, J.; Gersemann, J. und EXPO2000Hannover GmbH (Hrsg.), Hannover, 1998

[Gemis4.3] Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme, Version 4.3, Institut für angewandte Ökologie e.V., Freiburg, Darmstadt, Berlin 2005

[Gertis1997] Gertis, K.: Altbausanierung – Chancen für die Bauwirtschaft und ihre Beschäftigten. ARCONIS 3/1997, Stuttgart, 1997

[Gertis 1999] Gertis, K.: Energieeinsparung im Altbau- Solartechnik fragwürdig!, CCI, Jg. 33 Heft 4, 1999

[GG1976] Das Grundgesetz für die Bundesrepublik, BGBl 1949, 1, 23. Mai 1949, Textnachweis Geltung ab: 14.12.1976, letzte Änderung 2002

[GrüMess2002] Grübl, P., Messari, L.: Influence of The German Energy Saving Regulation on sustainable development of old buildings, Darmstadt concrete, Vol.17, 2002, Darmstadt 2002

[HeizAnlV1978] Verordnung über energiesparende Anforderungen an heizungstechnische Anlagen und Brauchwasseranlagen, Bundesgesetzblatt, 01.10.1978



- [HelmSim2001] Helm, C., Simonis U.: Verteilungsgerechtigkeit in der internationalen Umweltpolitik – Theoretische Fundierung und exemplarische Formulierung, Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung gGmbH, Berlin, 2001
- [Heye2004] Heye, H. Rechtliche Instrumente zur Reduktion der Treibhausgasemissionen, Verlag C.H. Beck, München, 2004
- [HoffWitt2004] Hoffmeyer, P., Wittmaier, M.: Entsorgungswirtschaft liefert wertvolle Rohstoffe, Umweltmagazin, September 2004, S. 18
- [IfE2004] Wagner, U., Geiger, b., Hardi, M., Brückl, O., Tzscheutscher, P.: Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik „CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten im Kraftwerksbereich, bei den erneuerbaren Energien sowie bei nachfrageseitigen Energieeffizienzmaßnahmen“, München, 2004
- [IFEU2005] Hertle, H., Duscha, M., Eisemann, L., Bliss, U.: Institut für Energie- und Umweltforschung in Heidelberg, Verbrauchs- oder Bedarfsspass? Anforderungen an den Energieausweis für Wohngebäude aus Sicht privater Käufer und Mieter. Heidelberg 2005
- [IFEU/IWU2005] Institut für Energie- und Umweltforschung in Heidelberg, Institut für Wohnen und Umwelt in Darmstadt, Beiträge der EnEV und des KfW-CO<sub>2</sub>-Gebäudesanierungsprogramm zum Nationalen Klimaschutz, Endbericht 2005
- [PIK2006] Scheffer, M., Brovkin, V. and Cox, P.: positive feedback between global warming and atmospheric CO<sub>2</sub> concentration inferred from past climate change, Geophysical Research Letters, vol. 33, 2006
- [IPCC2001] International Panel of Climate Change, Third Assessment-Report, Genf, 2001
- [IRB2006] Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB: Ökobilanz von Baustoffen, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2006
- [IWU2003] Institut für Wohnen und Umwelt, Darmstadt, Dokumentation Deutsche Gebäudetypologien, Stand Dezember 2003
- [Kasz1997] Kasz, M.: Ökonomische Konzepte zur Berechnung der Kosten von Maßnahmen zur CO<sub>2</sub>-Vermeidung, VEÖ-Journal 1997, H. 1-2, S. 54-59
- [KfW2001] Kreditanstalt für Wiederaufbau: Diskussionsbeiträge, Berücksichtigung von CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten bei Energievorhaben in der finanziellen Zusammenarbeit, Frankfurt, 2001
- [KfW2006] Kreditanstalt für Wiederaufbau, KfW-Förderbank, Förderberater Sanierung, Technisches Merkblatt für Maßnahmenpaket 4, Stand Juni 2006

[Kohler2004] Kohler, N.: Stand der Ökobilanzierung von Gebäuden und Gebäudebeständen, Institut für industrielle Bauproduktion, Universität Karlsruhe

[Messari2001] Messari, L.: The German Saving Regulation- What's new?, Darmstadt concrete, Vol.16, 2001, Darmstadt, 2001

[MVAHamm2005] Müllverbrennungsanlage MVA Hamm Betreiber GmbH, URL:  
<http://www.mva-hamm.de/energienutzung.html>

[NAP2006] Das Nationale Allokationsplan 2008-2012, Bundesregierung, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin, 2006

[Neddermann2005] Neddermann, R.: Kostenermittlung im Altbau, aktuelle Baupreise, rechtliche Grundlagen, technische Beurteilung, 3. Auflage, Werner, Wolters, Kluwer Deutschland, München, 2005

[NKP2005] Das Nationale Klimaschutzprogramm 2005, Bundesregierung, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin, 2005

[Pistohl2005] Pistohl, W.: Handbuch der Gebäudetechnik – Planungsgrundlagen und Beispiele. Band 2: Heizung/Lüftung/Energiesparen, 5. Auflage, Werner Verlag, München, 2005

[SBA2003A] Das Statistische Bundesamt: Wohneinheiten in Gebäuden mit Wohnraum nach dem Baujahr, 2002, letzte Aktualisierung am 13. August 2003

[SBA2003B] Das Statistische Bundesamt: Bewohnte Wohneinheiten in Wohngebäuden und sonstigen Gebäuden mit Wohnraum nach Belegung und Fläche im 2002, letzte Aktualisierung am 13. August 2003

[SBA2003C] Das Statistische Bundesamt: Haushalte nach Haushaltsstruktur und Art der Nutzung, 2002, letzte Aktualisierung 13. August 2003

[Schönwiese2006] Christian-Dietrich Schönwiese (Mitglied IPCC), Interview „von der Sonne verwöhnt“, Frankfurter Rundschau, Wissen und Bildung, Ausgabe Nr. 113 I S/R, Frankfurt, 2006

[Schulze2003] Schulze Darup, B.: Energetische Wohngebäudesanierung mit Faktor 10, Hannover 2003

[Schwickert2001] Schwickert, S.: Energetische Sanierung des Baubestandes - Möglichkeiten der Umsetzung, dargestellt an Wohngebäuden der Gemeinde Riedstadt/Leeheim, Dissertation D17, Darmstadt, 2001

[Stritz1994] Stritz, A.: Hochbaukonstruktionen nach ökologischen Gesichtspunkten, Diplomarbeit am Laboratorium für Energiesysteme, ETZ Zürich, 1994

[SenerTec2006] SenerTec Center Hessen Süd GmbH: Dachs Datenblatt, Dachsplanung, 2006

[UBA2004] Buchert, M. et al.: Forschungsbericht / Förderkennzeichen 298 92 303/02, Nachhaltiges Bauen und Wohnen in Deutschland / „Stoffflussbezogene Bausteine für ein nationales Konzept der nachhaltigen Entwicklung - Verknüpfung des Bereiches Bauen und Wohnen mit dem komplementären Bereich "Öffentliche Infrastruktur", im Auftrag des Umweltbundesamtes

[Varian2004] Varian, H.R.: Grundzüge der Mikroökonomie, 6. Auflage, München, 2004

[VIK2006] Richmann, A., Verband der Industriellen Energie- und Kraftwirtschaft e.v.: „Die Entwicklung der Energiemärkte und deren Auswirkungen auf die deutsche Wirtschaft“, Vortrag vor dem Ausschuss für Industrie, Technologie und Umwelt der Industrie- und Handelskammer Wuppertal-Solingen-Remscheid, Remscheid, 16. Mai 2006

[Walz1997] Walz, R.: Potentiale und Strategien zur CO<sub>2</sub>-Reduktion durch Energieeinsparung, in: Energiepolitik – technische Entwicklung, politische Strategien, Handlungskonzepte zu erneuerbaren Energien und zur rationellen Energienutzung in Berlin, Heidelberg, 1997

[WSchV1997] Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden, Bundesgesetzblatt, Bonn, 1977, Novellierungen in 1982 und 1994

[Wirsching2004] Wirsching, M.: KfW Bankengruppe, Determinanten der Preisbildung für Emissionsrechte (EU-Allowances) im Rahmen des europäischen Emissionshandelsystems, Herausgeber KfW Konzernkommunikation, Frankfurt, 2004

[Zehnder2002] Zehnder Heizkörper AG, Technische Daten – zehnder nova, Gränichen

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Endenergieverbrauch in % nach Sektor, eigene Darstellung nach [BMU2002].....	9
Abbildung 1.2: Baujahrverteilung in Deutschland (1998) nach [SBA2003A].....	10
Abbildung 1.3: EnEV-Minderungspotential, eigene Darstellung nach [IFEU/IWU2005].....	12
Abbildung 1.4: CO <sub>2</sub> -Emissionen verschiedener Gebäudestandards (Angaben ohne/mit Energieträgeraufwand, Darstellung leicht geändert [IFEU/IWU2005]).....	13
Abbildung 3.1: Zul. Jahresheizwärmebedarf in kWh/(m <sup>2</sup> a) nach WSchV und EnEV.....	23
Abbildung 4.1: Bilanzraum der Untersuchungen.....	28
Abbildung 4.2: Aufbau einer Ökobilanz [EN ISO 14040].....	29
Abbildung 4.3: CO <sub>2</sub> -Bilanz der Abfallwirtschaft [BMU/IFEU2005].....	32
Abbildung 5.1: Spez. CO <sub>2</sub> -Vermeidungskosten einer HLZ-Außenwand (Erläuterungen: s. Anhang A).....	52
Abbildung 5.2: Spez. CO <sub>2</sub> -Vermeidungskosten, Einsparungen, Vorketten und Minderungen im Vergleich (HLZ d=24 cm, WDVS, STW).....	53
Abbildung 5.3: Spez. CO <sub>2</sub> -Vermeidungskosten von Dämmmaßnahmen am geneigten Dach (Erläuterungen: s. Anhang A).....	54
Abbildung 5.4: Spez. CO <sub>2</sub> -Vermeidungskosten in Abhängigkeit der Dämmstärke, am Beispiel einer HLZ-Außenwand der Dicke 24 cm.....	55
Abbildung 5.5: Spez. CO <sub>2</sub> -Vermeidungskosten baulicher Sanierungsmaßnahmen im Vergleich (Erläuterungen: s. Anhang A).....	56
Abbildung 5.6: Spez. CO <sub>2</sub> -Vermeidungskosten apparativer Maßnahmen an einem EFH.....	57
Abbildung 5.7: Spez. CO <sub>2</sub> -Vermeidungskosten beim Umstieg auf regenerative Energien und BHKW an einem EFH.....	59
Abbildung 6.1: CO <sub>2</sub> -Ausstoß und technisches Minderungspotential der vor 1978 errichteten Gebäude im Vergleich.....	75
Abbildung 6.2: Entwicklung des Zertifikatspreises [EEX2006].....	78
Abbildung 6.3: Entwicklung der Strompreise und CO <sub>2</sub> -Zertifikatspreis [VIK2006].....	79
Abbildung 6.4: Eff. CO <sub>2</sub> -Vermeidungskostenkurve des MFH_E bei Öl Hgz. vor 1995.....	80
Abbildung 6.5: Eff. CO <sub>2</sub> -Vermeidungskostenkurve des GMH_E bei Öl Hgz. vor 1995.....	81
Abbildung 6.6: Eff. CO <sub>2</sub> -Vermeidungskostenkurve des EFH_C bei Öl Hgz. vor 1995.....	81
Abbildung 6.7: Eff. CO <sub>2</sub> -Vermeidungskostenkurve des RH_D bei Öl Hgz. vor 1995.....	82
Abbildung 6.8: Eff. CO <sub>2</sub> -Vermeidungskostenkurve GMH_E bei baulichen und apparativen Maßnahmen, Öl Hgz. vor 1995.....	83
Abbildung 6.9: Einfluß des Energiepreises und des Zinses auf die eff. CO <sub>2</sub> -Vermeidungskosten am MFH_E.....	85
Abbildung 6.10: Einfluß des Zertifikatspreises auf die eff. CO <sub>2</sub> -Vermeidungskosten am MFH_E.....	86
Abbildung 6.11: Eff. CO <sub>2</sub> -Vermeidungskosten am GMH_E mit und ohne CO <sub>2</sub> -Emissionshandel.....	87

Abbildung 6.12: Technisches (TMP) und wirtschaftliches Minderungspotential (WMP) pro Gebäudetyp im Vergleich, ohne Berücksichtigung der Verteilung.....	88
Abbildung 6.13: CO <sub>2</sub> -Ausstoß im unsanierten Zustand, technisches und wirtschaftliches Minderungspotential im Vergleich.....	88
Abbildung 7.1: Einfluß des Zertifikatspreises auf die monetären Effekte für das Gebäude GMH_E .....	94
Abbildung 7.2: Einfluß des Zertifikatspreises auf die monetären Effekte für das Gebäude MFH_E95 .....	

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1: Investitionen und CO <sub>2</sub> -Minderungspotentiale, dargestellt an der Gemeinde Riedstadt / Stand 2003 (HS: Heizstrom, NHS: Nichtheizstrom, EEG: Energieeinspeisung).....	16
Tabelle 3.1: Externe Kosten von Stromerzeugung nach [DLR/ISI2006] (GuD: Gas und Dampfkraftwerk).....	26
Tabelle 4.1: Funktionelle Einheiten der Untersuchungsobjekte.....	30
Tabelle 4.2: Lebensdauer der untersuchten Produkte bzw. Sanierungsobjekte.....	33
Tabelle 4.3: Auswahl der Bauhilfsstoffe.....	33
Tabelle 4.4: Auswahl der Fenster.....	34
Tabelle 4.5: Auswahl der Dämmstoffe und Abkürzungen.....	34
Tabelle 4.6: Überblick über typische Baukonstruktionen bei Sanierungsmaßnahmen.....	35
Tabelle 4.7: Wandsanierungen im Öko-Vergleich.....	36
Tabelle 4.8: Decken- und Bodensanierungen im Öko-Vergleich.....	37
Tabelle 4.9: Dachsanierungen im Öko-Vergleich.....	38
Tabelle 4.10: Fenstermodernisierung im Öko-Vergleich.....	39
Tabelle 4.11: Betrachtete Anlagen und Energieträger.....	40
Tabelle 4.12: Öko-Bilanz der Anlagen zur Wärmebereitstellung (Herstellung und Betrieb).....	41
Tabelle 4.13: Öko-Bilanz der Anlagen zur Stromerzeugung (Herstellung und Betrieb).....	43
Tabelle 4.14: Zusammensetzung der Ressourcen für verschiedene Stromarten.....	44
Tabelle 4.15: Öko-Bilanz der Brennstoffe und Strom.....	44
Tabelle 5.1: Faktor $f_{z,t}$ je Zinssatz und Laufzeit.....	47
Tabelle 5.2: CO <sub>2</sub> -Äquivalente einiger Heizsysteme – Ein Vergleich.....	50
Tabelle 5.3: Mittelwerte der spez. CO <sub>2</sub> -Vermeidungskosten apparativer Sanierungsmaßnahmen...	58
Tabelle 5.4: Durchschnittliche Spez. CO <sub>2</sub> -Vermeidungskosten beim Umstieg auf regenerative Energien und BHKW.....	60
Tabelle 6.1: Deutsche Gebäudetypologie nach IWU (ohne Sonderfälle).....	67
Tabelle 6.2: Eingangsparameter betrachteter Gebäude im Ist-Zustand.....	68
Tabelle 6.3: Angenommene Umstiegsrate auf andere Heizsysteme in %.....	71
Tabelle 6.4: Beheizungsstruktur (eE) in % nach [UBA2004].....	72
Tabelle 6.5: Gebäudeanzahl NG nach Gebäudetyp und Energieträger im Ausgangszustand.....	73
Tabelle 6.6: Technisches Minderungspotential (TMP) der betrachteten Gebäude in tCO <sub>2</sub> /a.....	74
Tabelle 6.7: Eingangsparameter für die Sensitivitätsanalyse.....	84
Tabelle 6.8: Betrachtete Szenarios (Energiepreis, Zinssatz).....	84
Tabelle 6.9: Eff. CO <sub>2</sub> -Vermeidungskosten des Gebäudes GMH_E mit und ohne CO <sub>2</sub> - Emissionshandel.....	86

## **Anhang**

Anhang A: Angaben zu Sanierungsobjekten und -alternativen

Anhang B: CO<sub>2</sub>-Äquivalente und KEA untersuchter Produkte

Anhang C: Datenblätter ökologischer Kennwerte von baulichen Maßnahmen

Anhang D: Technische Daten von Heizungsverteilungssystemen

Anhang E: Technische Daten von Anlagen zur Energiebereitstellung

Anhang F: Material-, Montage- und Investitionskosten von baulichen Maßnahmen

Anhang G: Investitionskosten von apparativen Maßnahmen

## Anhang A: Angaben zu Sanierungsobjekten und -alternativen

### Ist-Zustand der Bauteile, Sanierungsalternativen und Variationen der Dämmstoffe

Bauteil	Bez.	Ist-Zustand	$U_{ist}$ in $W/K.m^2$	Sanierungsmaßnahme Dämmstärke $d$ in cm	Variationen	$U_{neu}$ in $W/K.m^2$	
Wände gegen Außenluft	AW1	Ungedämmtes Mauerwerk 1850-1930: Vollziegel (VZ) 1930-65: Hochlochziegel (HLZ) bzw. Bims	HLZ24: 0,80 VZ 24: 1,73 VZ 30: 1,52	Wärmedämmputz (WDP) 2, 3, 4, 5 cm	auf EPS-Basis	max. 0,66 max. 1,18 max. 1,08	
	AW2	Ungedämmtes Mauerwerk Wie oben	Wie oben	Außendämmung (WDVS) 8, 10, 12, 14 cm	STW, HANF, EPS	max. 0,29 max. 0,37 max. 0,36	
	AW3	Ungedämmtes Mauerwerk Wie oben	Wie oben	Hinterlüftete Fassade 8, 10, 12, 14 cm	GLW, STW, EPS	max. 0,30 max. 0,38 max. 0,37	
	AW4	Ungedämmtes Mauerwerk Wie oben	Wie oben	Innendämmung (WDVS) 8, 10, 12, 14 cm	STW, HANF, EPS	max. 0,31 max. 0,39 max. 0,38	
Wände gegen Erdreich	KW1	Ungedämmtes Mauerwerk (mit alter Bitumenschicht)	HLZ24: 0,84 VZ 24: 1,96 VZ 30: 1,69	Perimeterdämmung, Abdichtung 8, 10, 12, 14 cm	SGL, PUR, EPS	max. 0,32 max. 0,40 max. 0,39	
Decken gegen unbeheizte Räumen	DE1	Ungedämmte Holzbalkenkonstruktion 1930-1960	Keller: 1,31 Decke: 1,46	Zwischensparrendämmung, Dampfbremse, Putz $d$ = Sparrendicke 15 cm	GLW, SRP, EPS	$U_{Keller}$ 0,27 $U_{Decke}$ 0,28	
	DE2	Stahlbetondecke mit Dämmung Estrich (1960-1975 bzw. 1975- 1984)	1,05	Dämmung und Putz 8, 10, 12, 14 cm	GLW, STW, HWL	max. 0,54	
	DE3	Holzbalkenkonstruktion Holzdecke 1930-1960	1,31	Zwischen- u. Untersparren- dämmung mit Verschalung 8, 10, 12, 14 cm	GLW, STW, EPS	0,19	
Boden gegen Erdreich	BO1	Magerbeton, Beton, Bitumenabdichtung, Estrich	3,69	Trittschalldämmung, Folie und Estrich / 8, 10, 12, 14 cm	GLW,STW, EPS	0,24 bis 0,39	
Dächer gegen Außenluft	Flachdach	DA1	Duodach	1,31	Dämmung und Abdichtung/ 8, 12, 16, 20 cm	SGL, PUR, BLP	max. 0,28
		DA2	Umkehr- / Plusdach	1,31	Dämmung und Abdeckung mit Kies / $d$ wie oben	SGL, PUR, EPS	max. 0,36
	Geneigtes Dach	DA3	Holzkonstruktion 1850-1930	3,70	Aufsparrendämmung u. Wiederverwendung der Dacheindeckung / 16 cm	PUR, SGL, GLW	0,27
		DA4	Holzkonstruktion 1850-1930	3,70	Zwischensparrendämmung / 16 cm	ZEL, SGL, GLW	0,27
		DA5	Holzkonstruktion 1850-1930	3,70	Zwischen- und Untersparren- dämmung / 8, 10, 12, 14 cm	ZEL, SGL, GLW	max. 0,19
		DA6	Holzkonstruktion 1850-1930	0,63	Untersparren-an bestehende Zwischensparrendämmung / 8, 10, 16, 20 cm	ZEL, SGL, GLW	max. 0,22
Fenster	FEN	Einsatz moderner Verglasung	Holz: 2,80 ALU: 4,38 PVC: 2,97	Fensteraustausch	3-ISG, 2-/3- WSG Rahmen aus Holz, ALU, PVC	min. 1,07 max. 1,93	



## Anhang B: CO<sub>2</sub>-Äquivalente und KEA untersuchter Produkte

<i>Bauhilfsstoffe</i>	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	<i>CO<sub>2</sub>-Äquivalent</i> [kgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> ]	<i>KEA<sub>ne</sub></i> [kwh/m <sup>3</sup> ]	<i>KEA<sub>e</sub></i> [kwh/m <sup>3</sup> ]
<b>Putze</b>				
Kalkzementputz	1800	265,55	171,91	3,86
Kunstharzputz	1100	550,69	149,92	10,15
Zementputz	2000	450,74	350,15	8,75
Wärmedämmputz	200	248,57	224,41	3,14
<b>Bauplatten, Holzwerkstoffe</b>				
Gipskartonplatte	900	205,02	151,70	11,69
Schnittholz/ Brettholz	495	202,85	284,53	613,35
Schnittholz/ Kantholz	600	68,46	84,06	127,59
Spanplatte	700	160,50	350,71	888,87
<b>Abdichtungen und Beschichtungen</b>				
Bitumenanstrich	600	553,27	-207,90	1,64
PE-Dampfbremse	820	2.068,32	863,51	94,23
PE-Dichtungsbahn	1200	2.164,12	287,31	41,74
<b>Dachbaustoffe</b>				
Betondachstein	2400	581,66	431,22	11,31
Bitumendachbahn	1200	886,59	574,01	10,12
Dachziegel	1800	834,77	491,77	17,94
Faserzement-Dachplatte	2000	2.288,29	1871,02	56,27
<b>Massiv-Baustoffe, Schüttungen</b>				
Kies	1580	16,82	19,05	1,61
Zementestrich	2000	370,23	286,90	6,47
<b>Sonstige Bauhilfsstoffe</b>				
Stahlblech, verzinkt	7500	18.210,53	45.523,47	273,33
	$m_B$ [kg/m <sup>2</sup> ]	<i>CO<sub>2</sub>-Äquivalent</i> [kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> ]	<i>KEA<sub>ne</sub></i> [kwh/m <sup>2</sup> ]	<i>KEA<sub>e</sub></i> [kwh/m <sup>2</sup> ]
Glasfasergewebe	0,17	0,35	0,64	0,04
Klebmasse	4,50	1,00	0,82	0,02

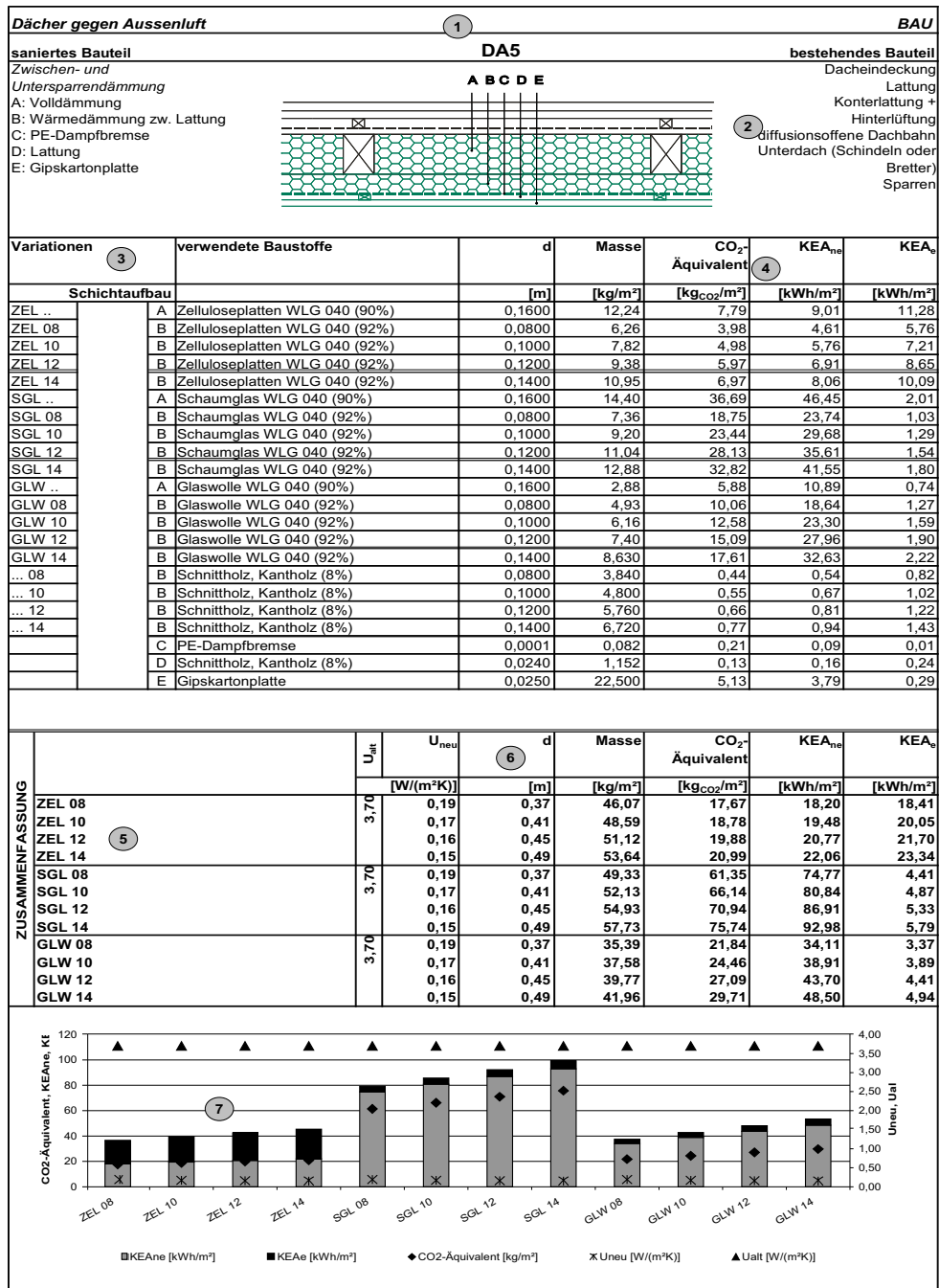
<b>Dämmstoffe</b>	<b><math>\rho</math></b> <b>[kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>CO<sub>2</sub>-Äquivalent</b> <b>[kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>]</b>	<b>KEA<sub>ne</sub></b> <b>[kwh/m<sup>3</sup>]</b>	<b>KEA<sub>e</sub></b> <b>[kwh/m<sup>3</sup>]</b>
BLP 050	100	129,44	118,98	1,52
GLW TSD 035	67	136,70	253,31	17,23
GLW TSD 040	67	136,70	253,31	17,23
GLW WDF 040	20	40,81	75,61	5,14
HAN 040	30	23,59	28,38	1,18
HWL 090	460	143,04	69,00	4,67
EPS FD 040	18	58,01	33,01	0,75
EPS TSD 044	11	35,45	20,17	0,46
EPS 040	30	96,68	55,01	1,25
PUR 040	80	371,03	447,49	10,14
SGL 040	100	254,80	322,57	13,99
SRP 045	190	29,73	69,59	4,82
STW WDF 040	30	32,11	76,99	1,12
STW TSD 036	85	90,99	218,14	3,17
STW TSD 040	85	90,99	218,14	3,17
STW 040	149	159,50	382,39	5,56
ZEL 040	85	54,09	62,59	78,32

<b>Flachglas</b>	<b><math>\rho</math></b> <b>[kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>CO<sub>2</sub>-Äquivalent</b> <b>[kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>]</b>	<b>KEA<sub>ne</sub></b> <b>[kwh/m<sup>2</sup>]</b>	<b>KEA<sub>e</sub></b> <b>[kwh/m<sup>2</sup>]</b>
Flachglas, unbeschichtet	2500	2665,78	2838,75	41,72
Flachglas, beschichtet	2500	2752,29	3009,37	57,01
<b>Rahmenmaterial</b>	<b><math>m_B</math></b> <b>[kg/m<sup>2</sup>]</b>	<b>CO<sub>2</sub>-Äquivalent</b> <b>[kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>]</b>	<b>KEA<sub>ne</sub></b> <b>[kwh/m<sup>2</sup>]</b>	<b>KEA<sub>e</sub></b> <b>[kwh/m<sup>2</sup>]</b>
Aluminium	18,5	83,24	120,37	4,79
Holz	11,2	26,87	45,40	6,58
Kunststoff PVC	20,4	44,94	74,68	1,61

## **Anhang C: Datenblätter ökologischer Kennwerte von baulichen Maßnahmen**

### **Beschreibung der Datenblätter am Beispiel der Außenwandsanierung DA5 (siehe nächste Seite)**

- (1) Oben links wird das zu sanierende Bauteil angegeben. „BAU“ steht für bauliche Sanierungsmaßnahmen.
- (2) In dieser Zeile werden links der bestehende Aufbau und rechts die neuen Schichten des zu sanierenden Bauteils aufgeführt. Eine Skizze veranschaulicht und grenzt den Ist- vom sanierten Zustand ab. Großbuchstaben werden den neuen Schichten zugeordnet.
- (3) Die Variationen der verwendeten Dämmstoffe sowie deren Dicken lassen sich über einen Code identifizieren. Die ersten drei Buchstaben stehen für den gewählten Dämmstoff und die zweistellige Zahl für die Schichtdicke in cm. „ZEL 12“ bedeutet, daß eine 12 cm dicke Zelluloseplatte eingebaut wird. Punkte (...) im Code weisen auf die Unabhängigkeit von Dämmstoff oder Dicke hin. Ist ein Feld leer, so fließen die Ergebnisse des verwendeten Baustoffs in jede Variation ein. Die Angaben in % hinter den verwendeten Baustoffen geben den Anteil vom eingebauten Material in der gleichen Schicht wieder.
- (4) Die CO<sub>2</sub>-Äquivalente und KEA-Werte ergeben sich aus den Ökobilanzergebnissen auf Basis der funktionellen Einheit, multipliziert mit der Schichtdicke.
- (5) Hier werden die Sanierungsmaßnahmen mit abgekürzter Bezeichnung anhand des Dämmstoffmaterials und der Dämmstoffdicke zusammengefaßt.
- (6) Die Beurteilung der wärmeschutztechnischen Verbesserung durch eine Sanierungsmaßnahme erfolgt anhand des Wärmedurchgangskoeffizienten U.
- (7) Abbildung der Öko-Bilanzwerte und Angabe des U-Wertes vor und nach der Sanierung.



**Datenblätter ökologischer Kennwerte von baulichen Maßnahmen**

Außenwandsanierung (AW1 – AW4)

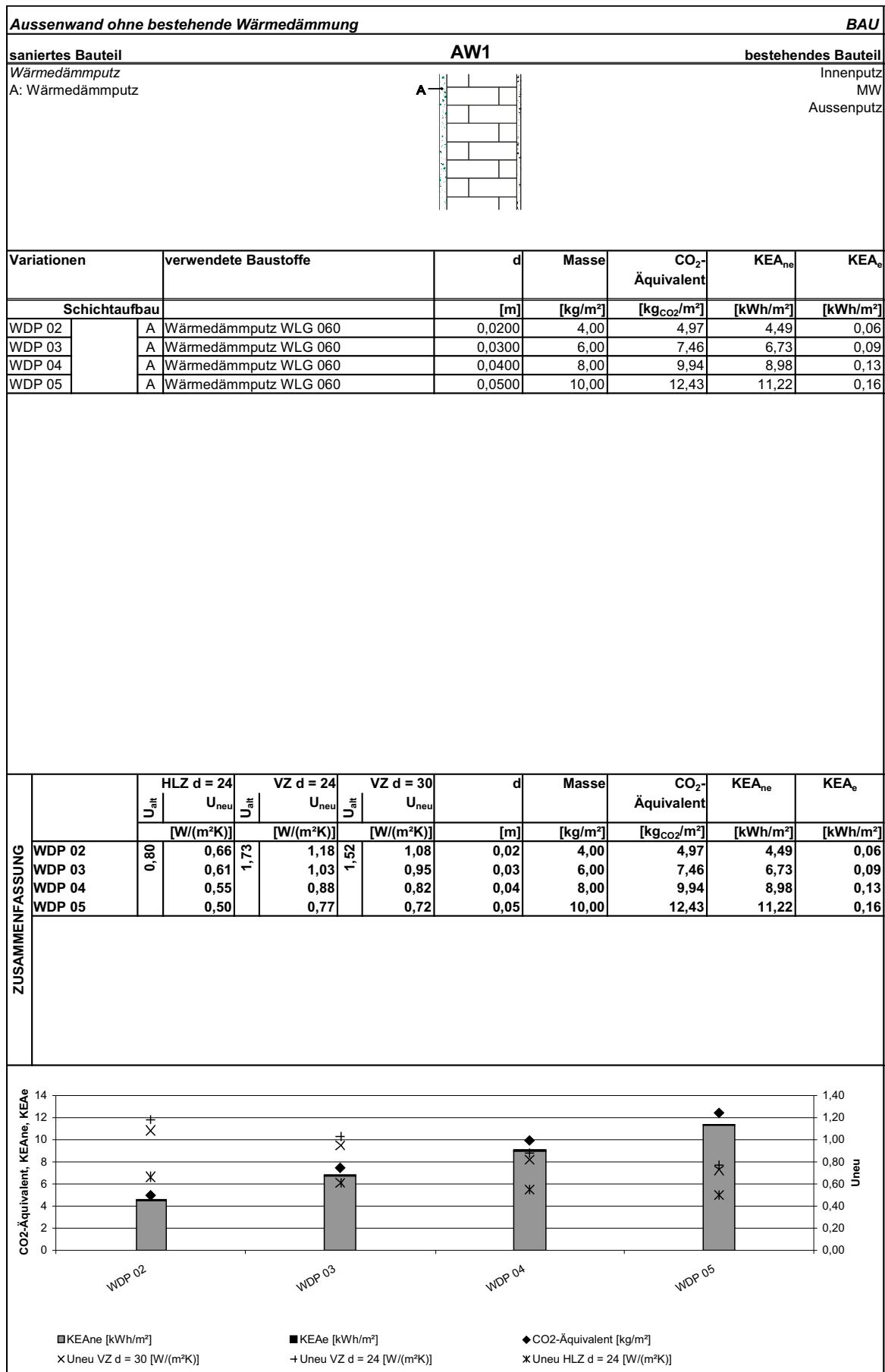
Kellerwandsanierung (KW1)

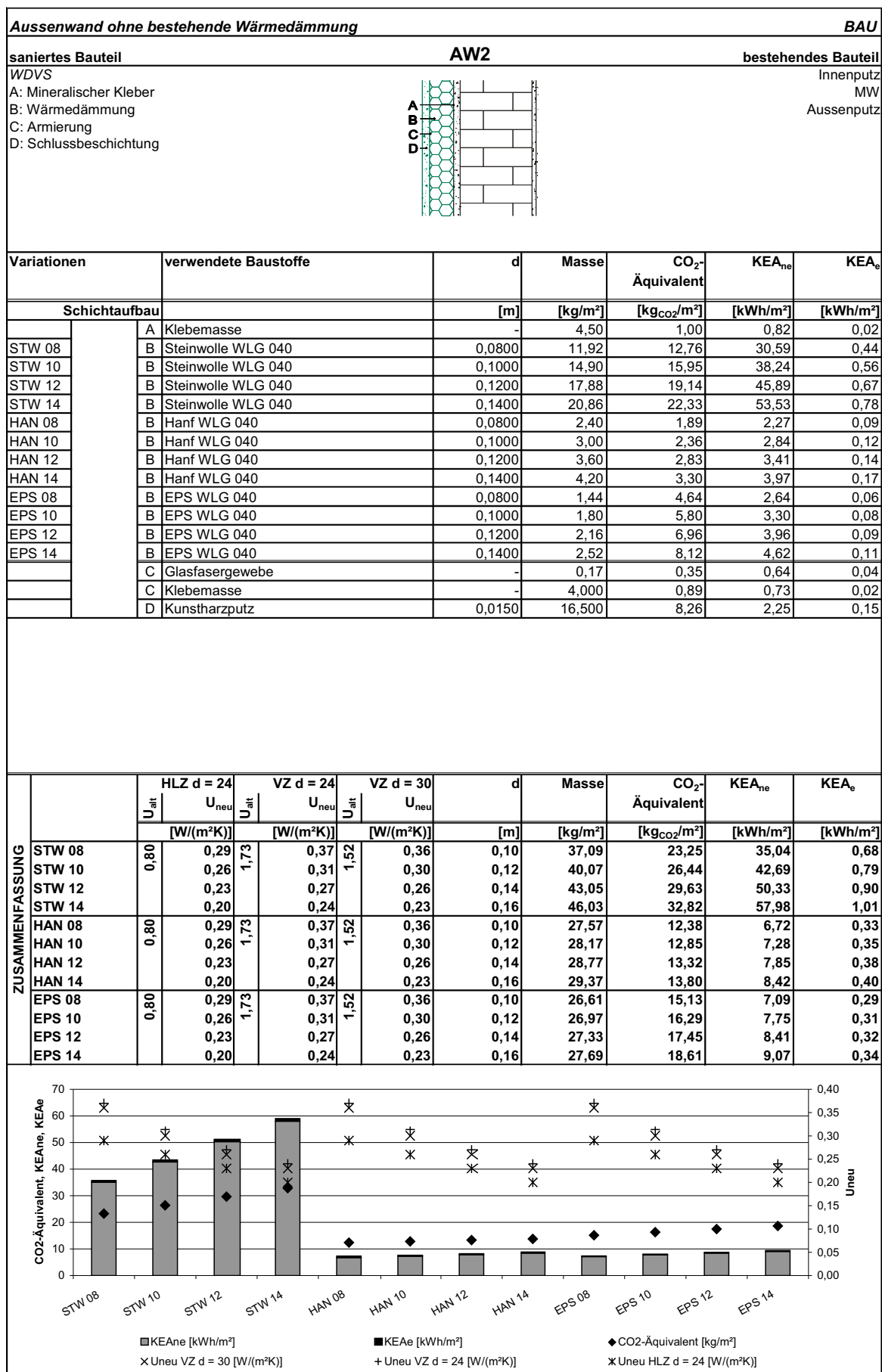
Deckensanierung (DE1 – DE3)

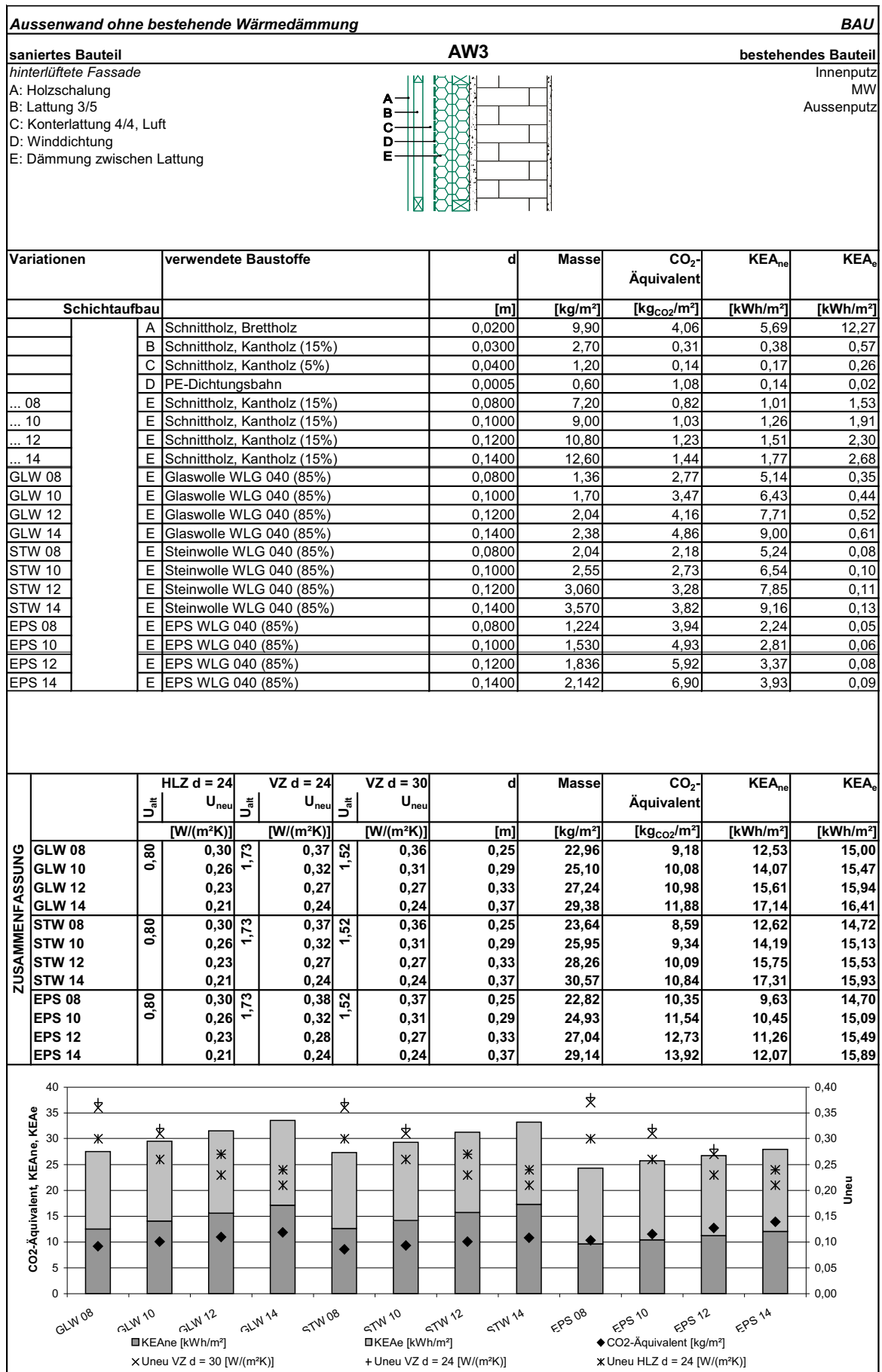
Bodensanierung (BO1)

Dachsanierung (DA1 – DA6)

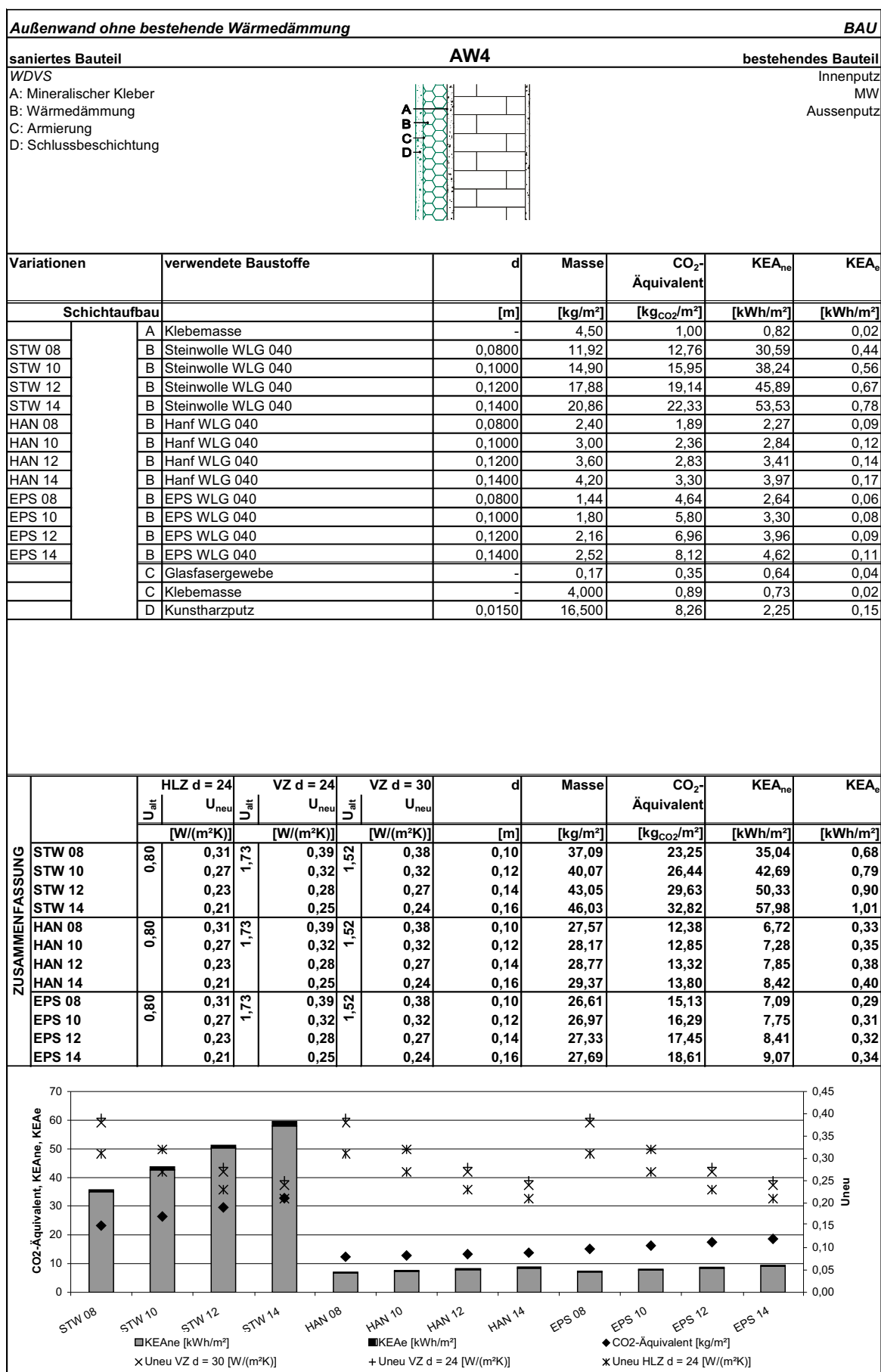
Fenstermodernisierung (GLA, FEN)

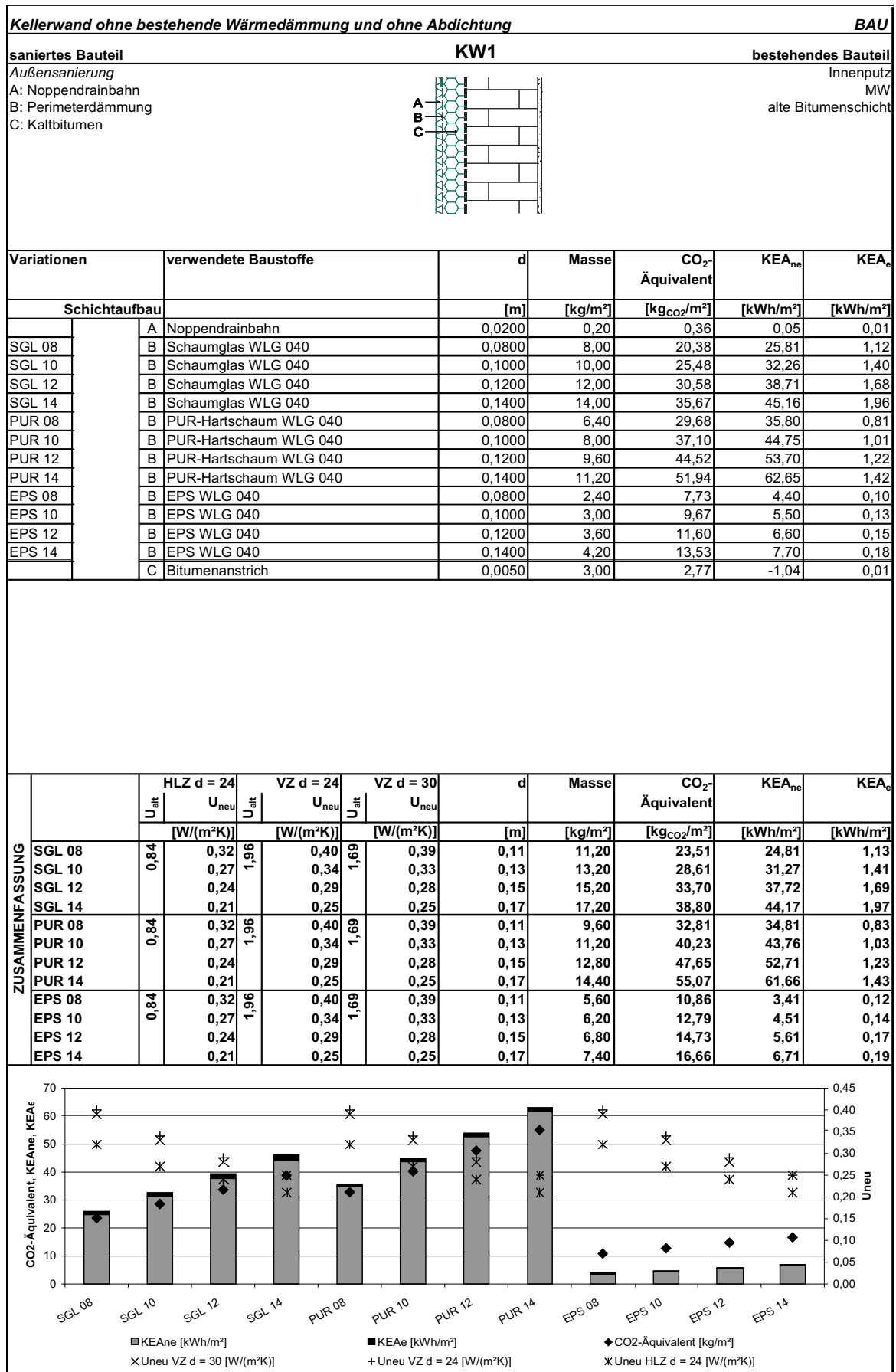


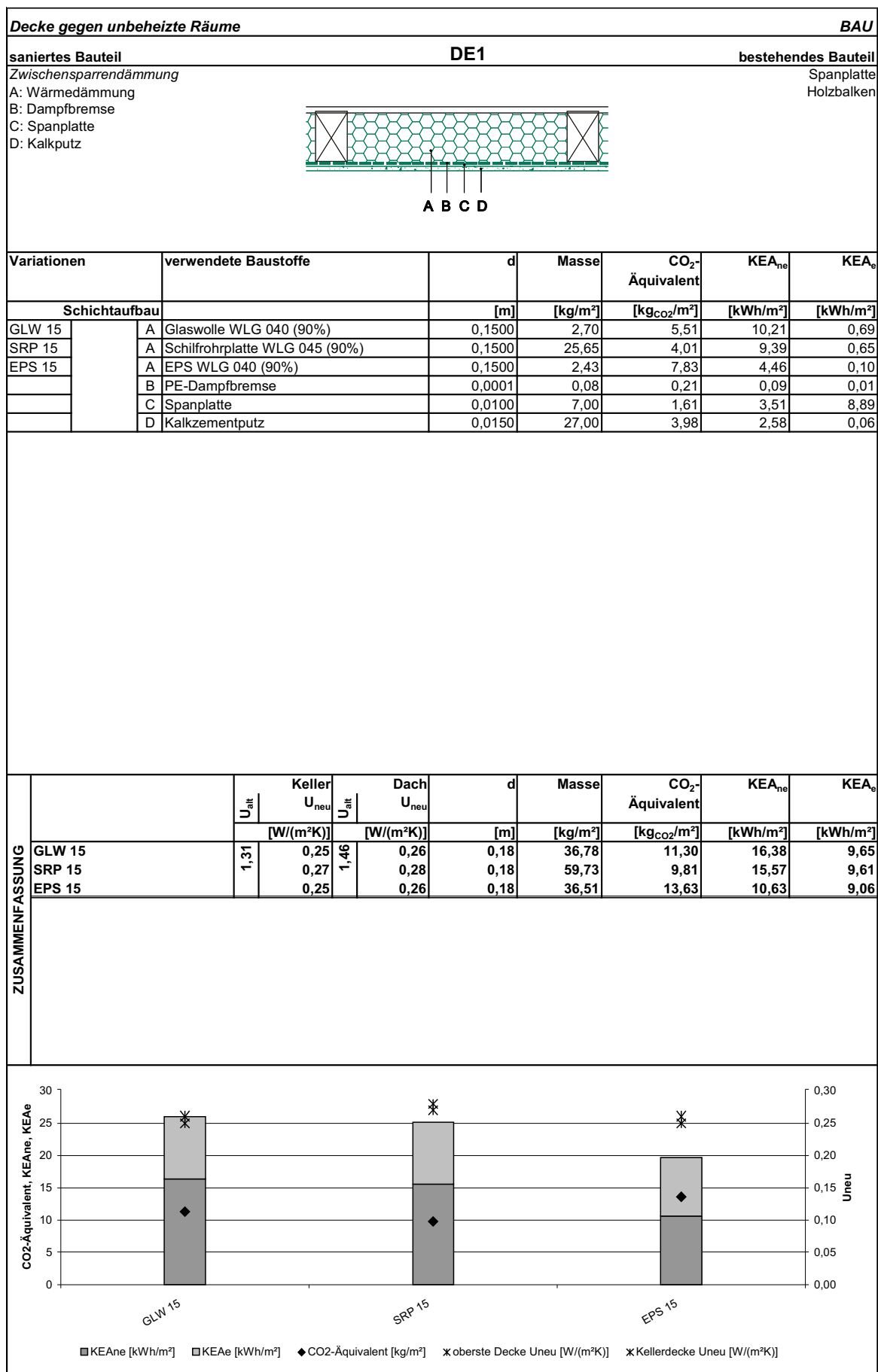


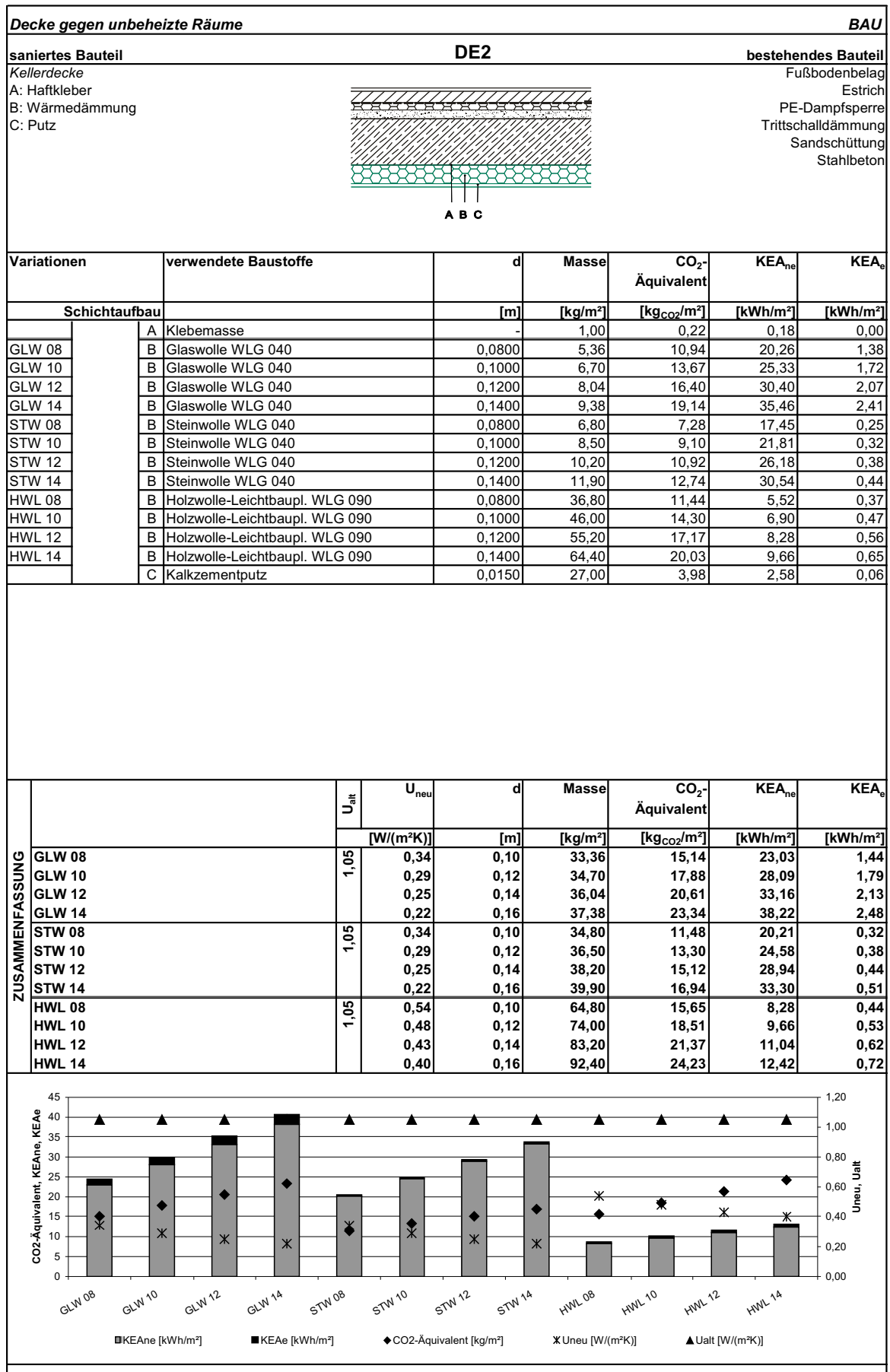


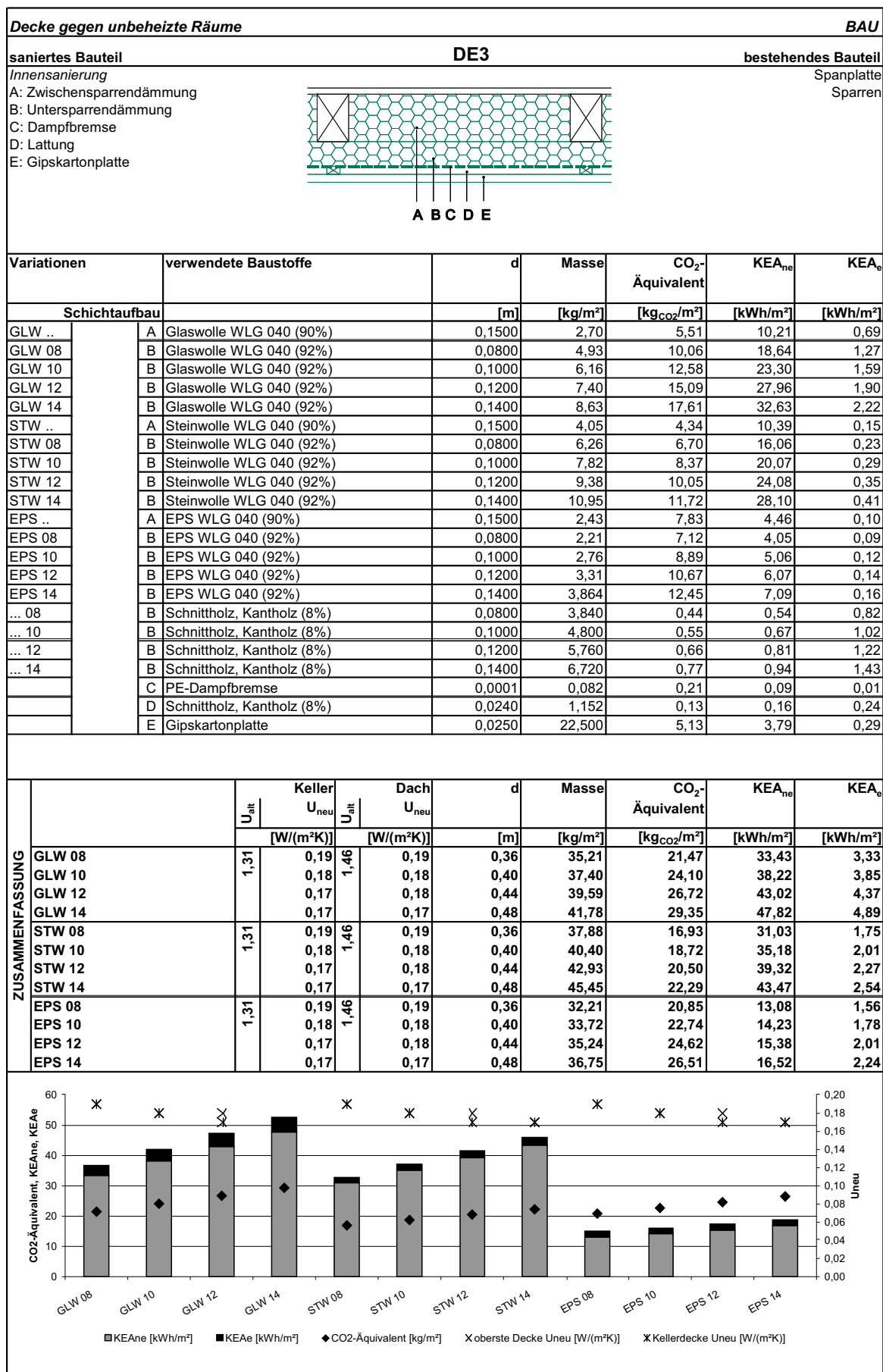


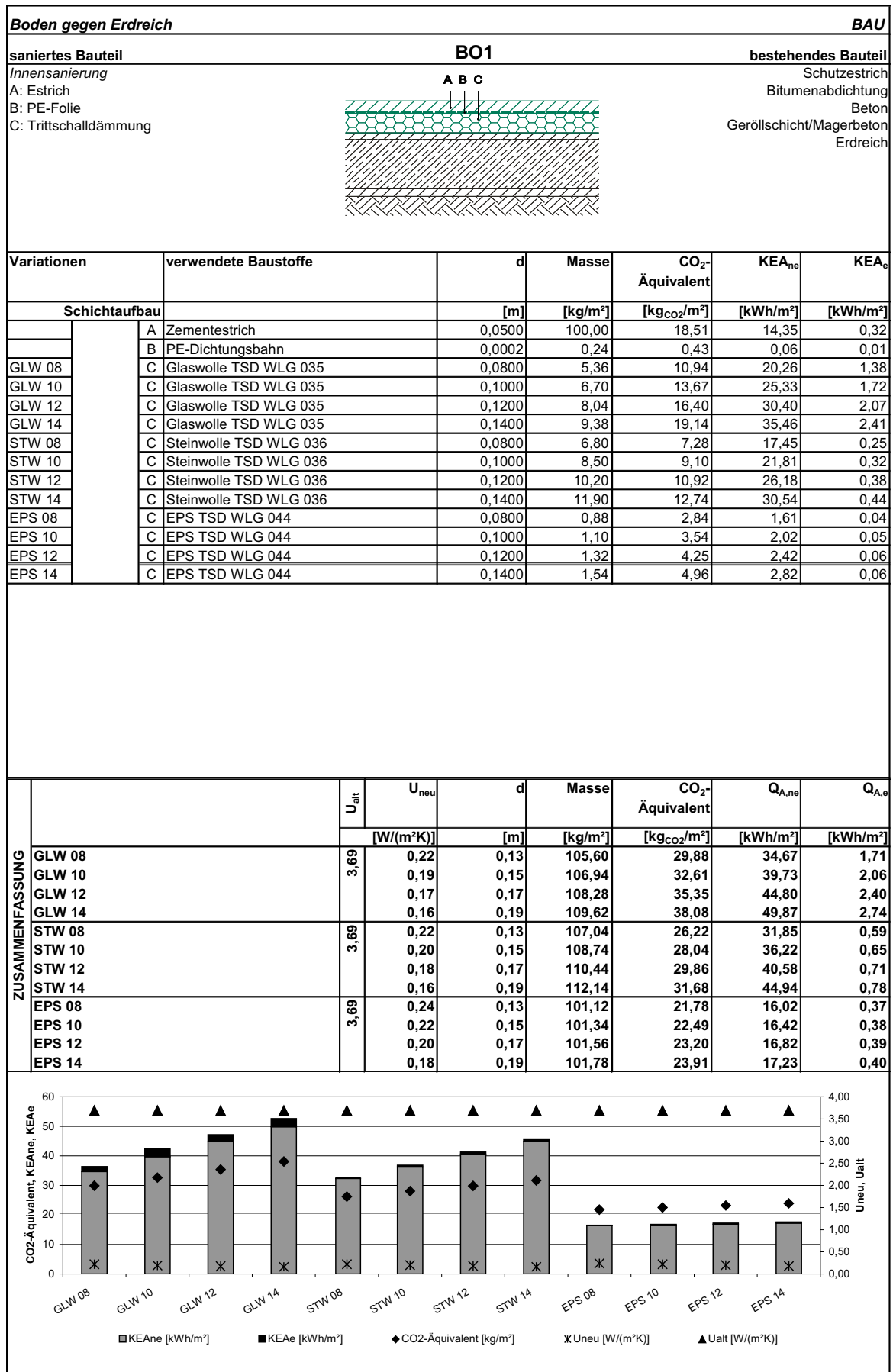












**Dächer gegen Aussenluft**

**saniertes Bauteil**  
*Flachdach - Duodach*  
A: Abdichtung  
B: Wärmedämmung  
C: Bitumendachbahn

**bestehendes Bauteil**  
Kies (nach Sanierung weiterverwendet)  
Bitumenabdichtung  
Wärmedämmung  
Alu-Bitumendampfsperre  
Dampfdruckausgleich  
Bitumenvoranstrich  
Stahlbeton >2% Gefälle  
Gipsputz

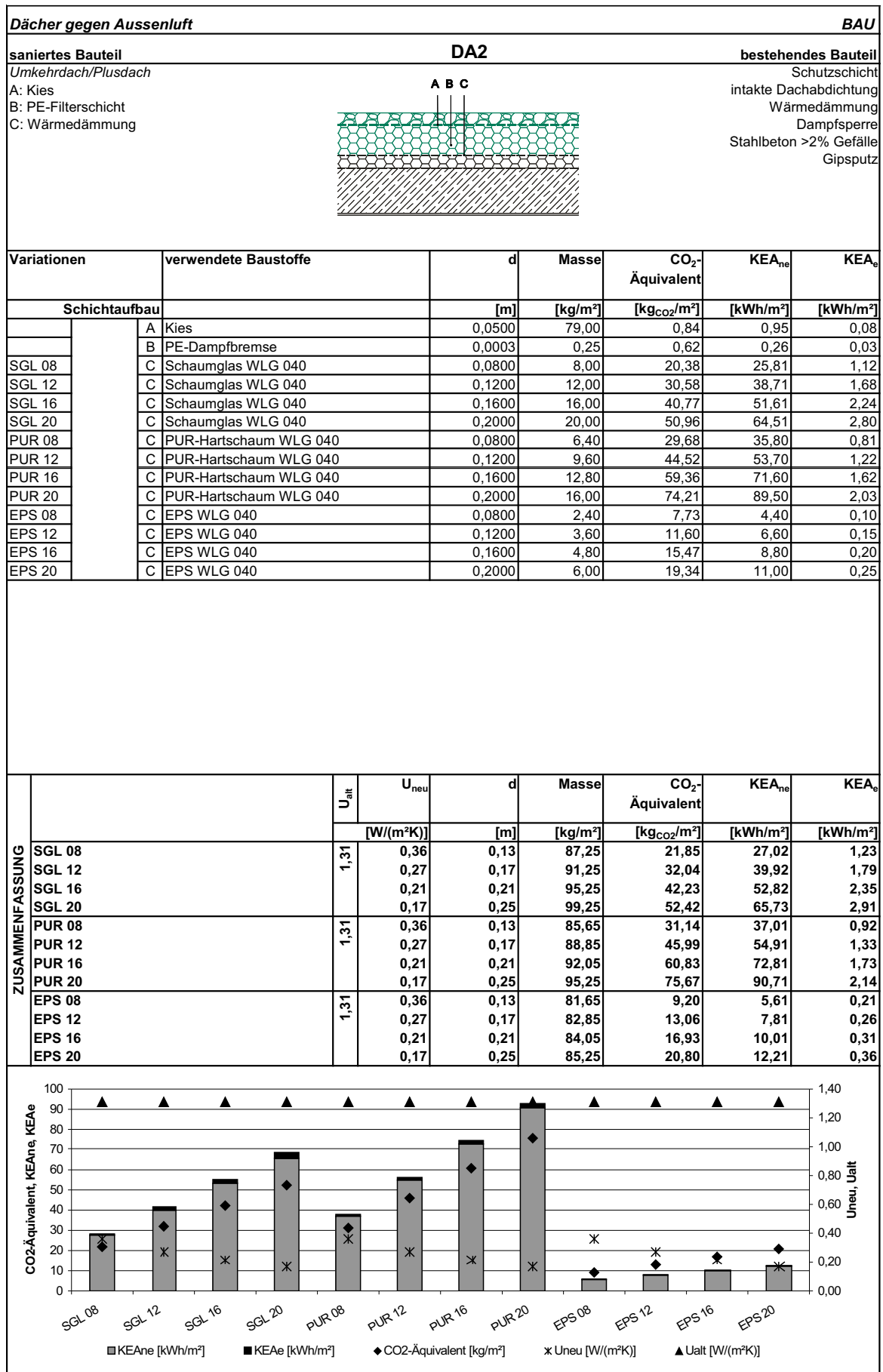
Variationen	verwendete Baustoffe	d	Masse	CO <sub>2</sub> -Äquivalent	KEA <sub>ne</sub>	KEA <sub>e</sub>
Schichtaufbau		[m]	[kg/m²]	[kgCO <sub>2</sub> /m²]	[kWh/m²]	[kWh/m²]
	A PE-Dampfbremse	0,0003	0,25	0,62	0,26	0,03
SGL 08	B Schaumglas WLG 040	0,0800	8,00	20,38	25,81	1,12
SGL 12	B Schaumglas WLG 040	0,1200	12,00	30,58	38,71	1,68
SGL 16	B Schaumglas WLG 040	0,1600	16,00	40,77	51,61	2,24
SGL 20	B Schaumglas WLG 040	0,2000	20,00	50,96	64,51	2,80
PUR 08	B PUR-Hartschaum WLG 040	0,0800	6,40	29,68	35,80	0,81
PUR 12	B PUR-Hartschaum WLG 040	0,1200	9,60	44,52	53,70	1,22
PUR 16	B PUR-Hartschaum WLG 040	0,1600	12,80	59,36	71,60	1,62
PUR 20	B PUR-Hartschaum WLG 040	0,2000	16,00	74,21	89,50	2,03
BLP 08	B Blähperlite WLG 050	0,0800	8,00	10,36	9,52	0,12
BLP 12	B Blähperlite WLG 050	0,1200	12,00	15,53	14,28	0,18
BLP 16	B Blähperlite WLG 050	0,1600	16,00	20,71	19,04	0,24
BLP 20	B Blähperlite WLG 050	0,2000	20,00	25,89	23,80	0,30
	C Bitumendachbahn	0,0090	10,80	7,98	5,17	0,09

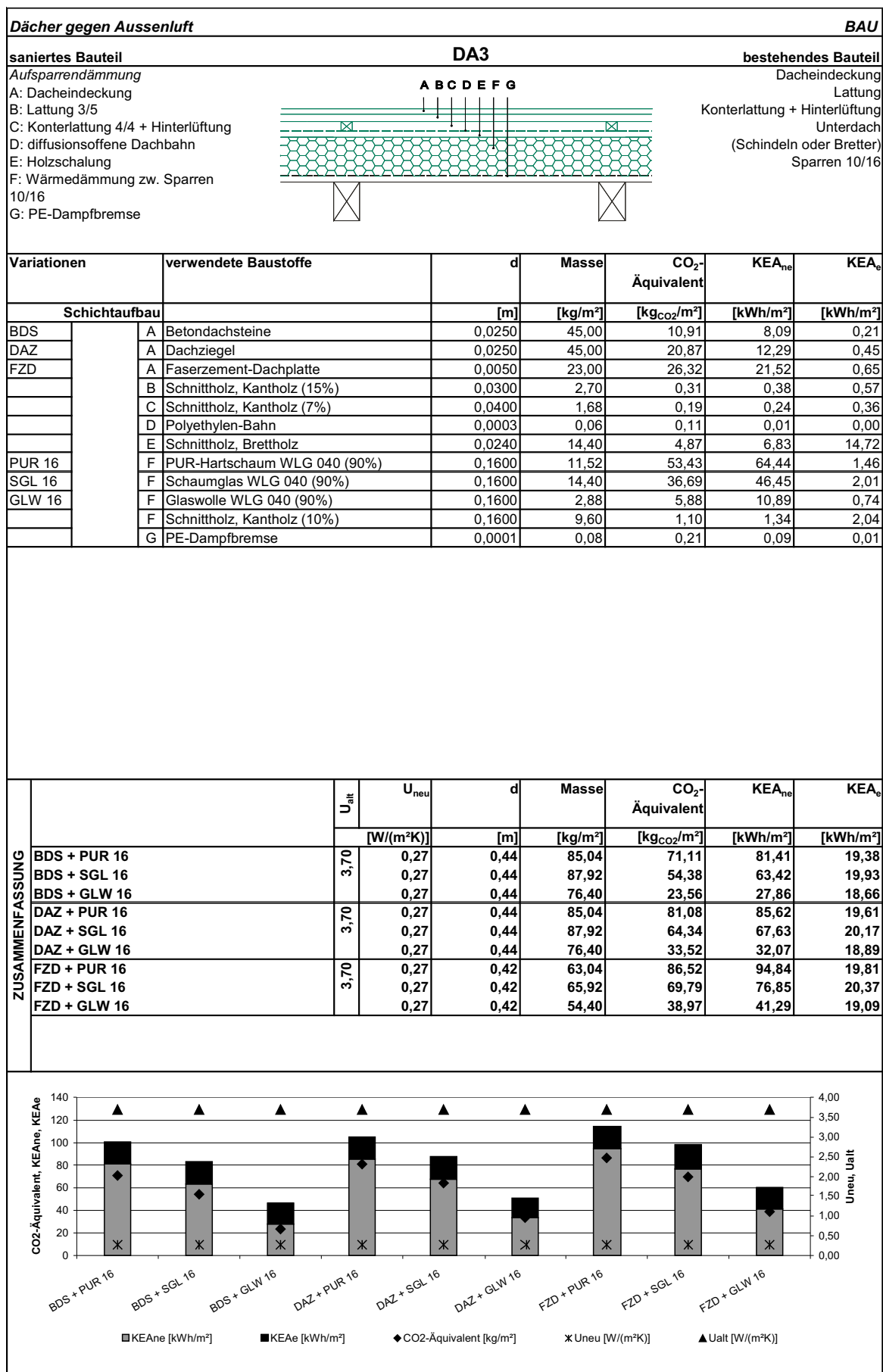
ZUSAMMENFASSUNG	U <sub>alt</sub>	U <sub>neu</sub>	d	Masse	CO <sub>2</sub> -Äquivalent	KEA <sub>ne</sub>	KEA <sub>e</sub>
	[W/(m²·K)]	[W/(m²·K)]	[m]	[kg/m²]	[kgCO <sub>2</sub> /m²]	[kWh/m²]	[kWh/m²]
SGL 08	1,31	0,25	0,09	19,05	28,98	31,23	1,24
SGL 12	1,31	0,20	0,13	23,05	39,18	44,13	1,80
SGL 16	1,31	0,17	0,17	27,05	49,37	57,04	2,36
SGL 20	1,31	0,14	0,21	31,05	59,56	69,94	2,92
PUR 08	1,31	0,25	0,09	17,45	38,28	41,22	0,93
PUR 12	1,31	0,20	0,13	20,65	53,12	59,12	1,34
PUR 16	1,31	0,17	0,17	23,85	67,96	77,02	1,74
PUR 20	1,31	0,14	0,21	27,05	82,81	94,92	2,15
BLP 08	1,31	0,28	0,09	19,05	18,95	14,94	0,24
BLP 12	1,31	0,23	0,13	23,05	24,13	19,70	0,30
BLP 16	1,31	0,19	0,17	27,05	29,31	24,46	0,36
BLP 20	1,31	0,17	0,21	31,05	34,49	29,22	0,42

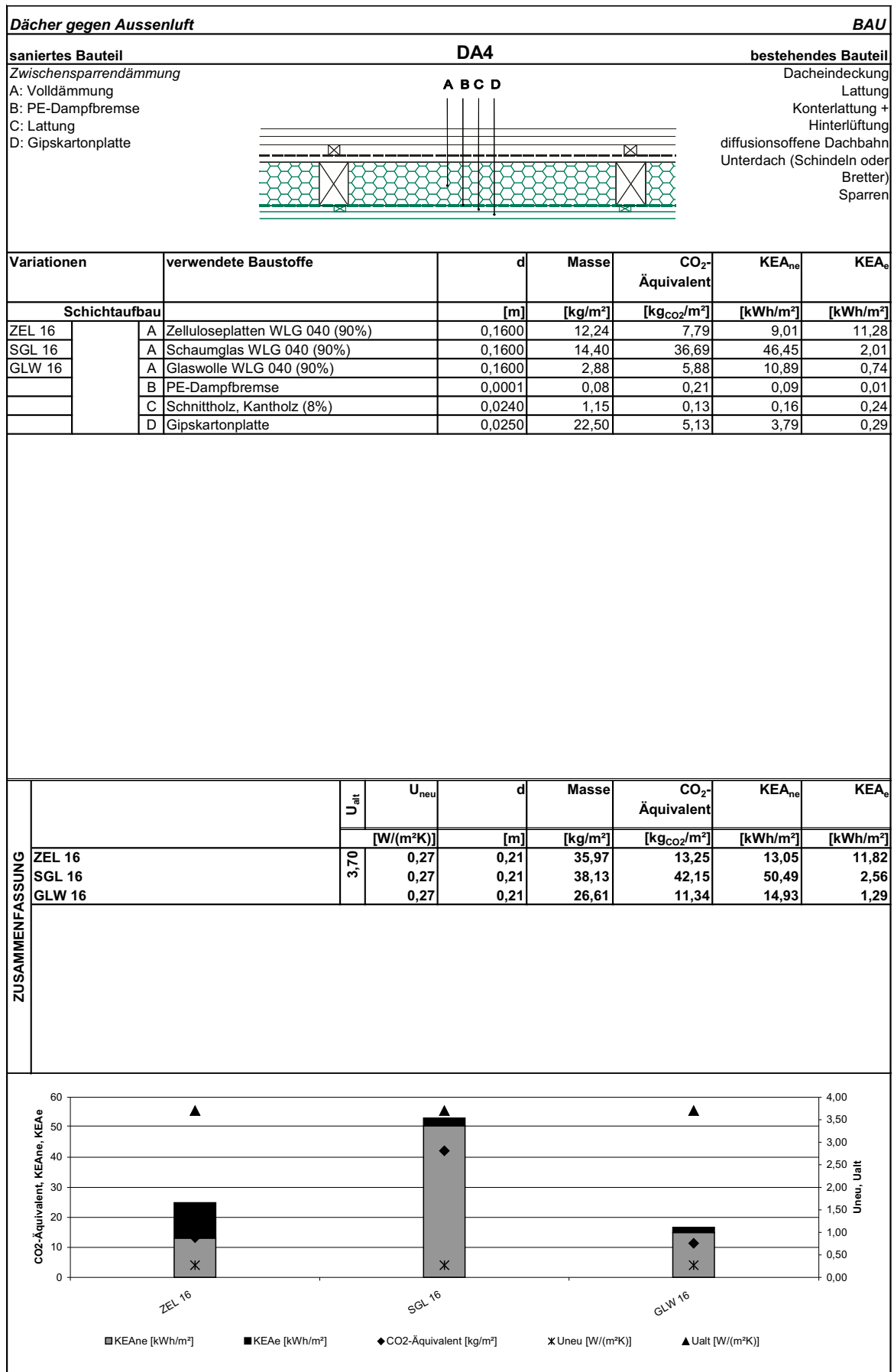
  

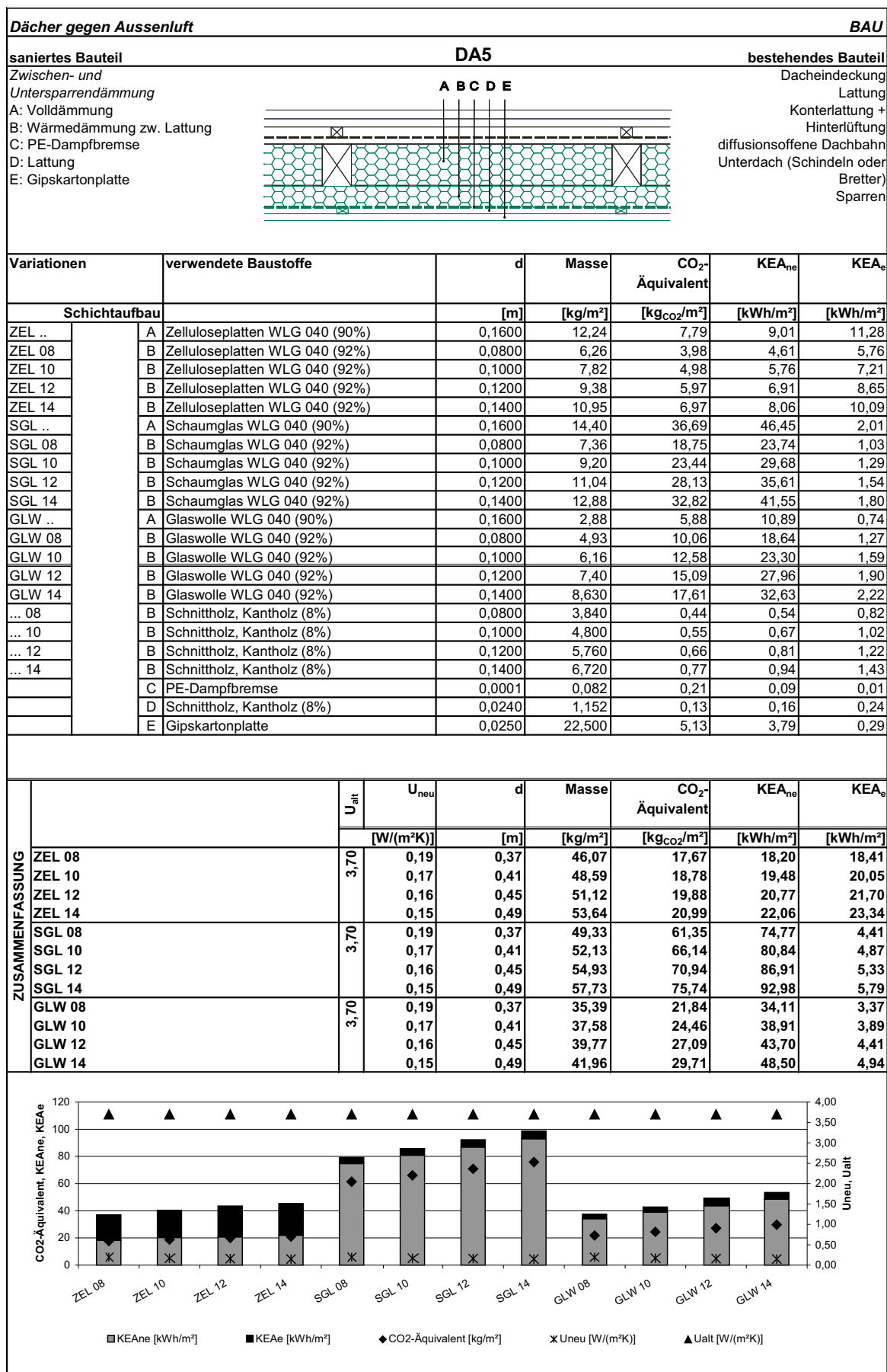
Legend:  
■ KEA<sub>ne</sub> [kWh/m²]  
■ KEA<sub>e</sub> [kWh/m²]  
◆ CO<sub>2</sub>-Äquivalent [kg/m²]  
✕ U<sub>neu</sub> [W/(m²·K)]  
▲ U<sub>alt</sub> [W/(m²·K)]

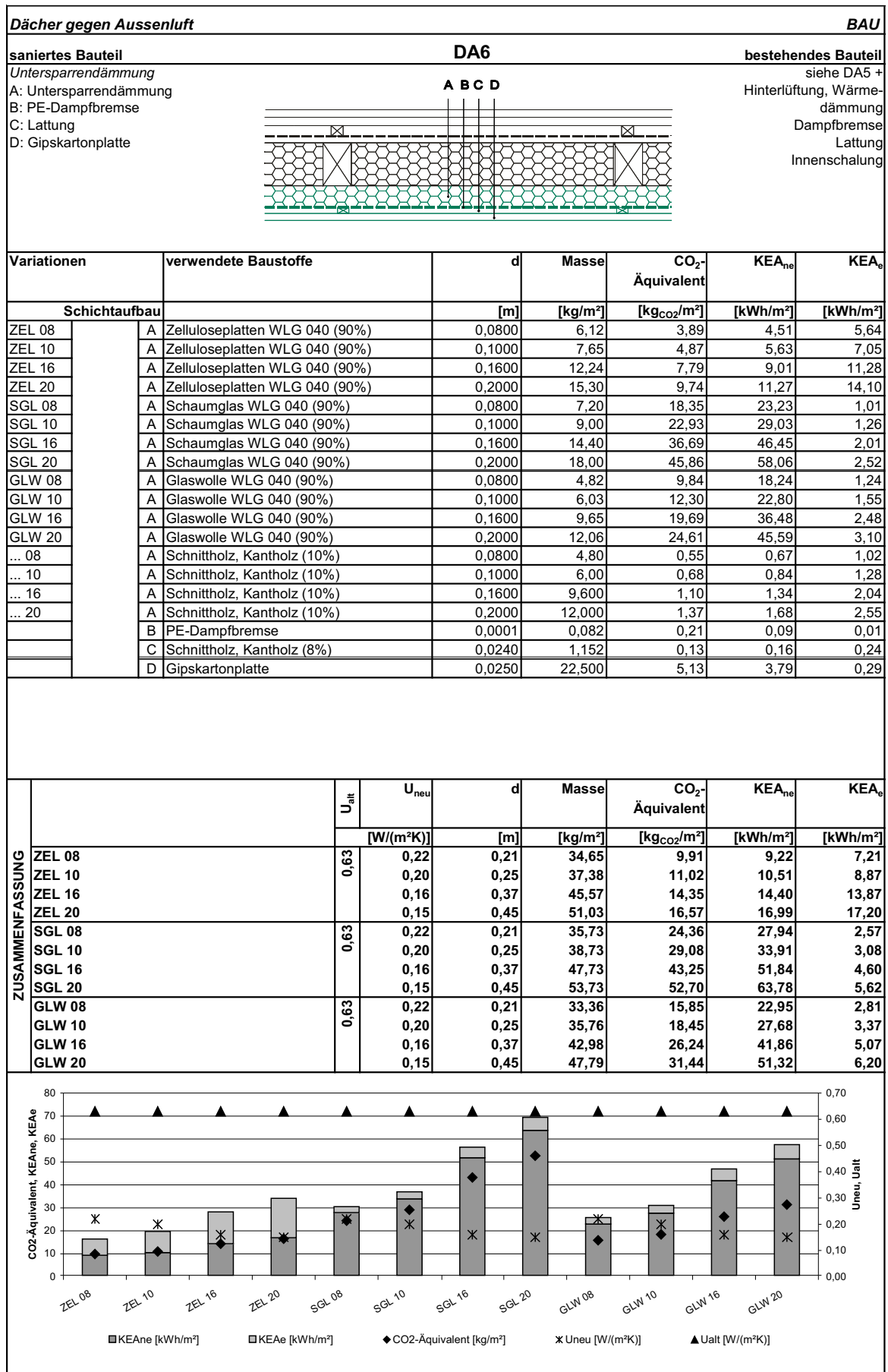












Verglasungsarten							BAU
neues Bauteil				GLA			
Einfachverglasung: 1VGL							
Isolierverglasung 3-fach: 3ISG							
Wärmeschutzverglasung 2-fach: 2WSG							
Wärmeschutzverglasung 3-fach: 3WSG							
A: Floatglas							
B: Luft, Abstandhalter							
C: Floatglas							
D: Luft, Abstandhalter							
E: Floatglas							
Variationen		verwendete Baustoffe	d	Masse	CO <sub>2</sub> -Äquivalent	KEA <sub>ne</sub>	KEA <sub>e</sub>
Schichtaufbau			[m]	[kg/m²]	[kgCO <sub>2</sub> /m²]	[kWh/m²]	[kWh/m²]
1VGL 006	A	Floatglas, unbeschichtet	0,0060	15,00	15,99	17,03	0,25
3ISG 028	A	Floatglas, unbeschichtet	0,0040	10,00	10,66	11,35	0,17
3ISG 028	B	Stahlblech, verzinkt (0,25%)	0,0080	0,15	0,36	0,91	0,01
3ISG 028	C	Floatglas, unbeschichtet	0,0040	10,00	10,66	11,35	0,17
3ISG 028	C	Stahlblech, verzinkt (0,25%)	0,0080	0,15	0,36	0,91	0,01
3ISG 028	E	Floatglas, unbeschichtet	0,0040	10,00	10,66	11,35	0,17
2WSG 024	A	Floatglas, beschichtet	0,0040	10,00	11,01	12,04	0,23
2WSG 024	B	Stahlblech, verzinkt (0,25%)	0,0160	0,30	0,73	1,82	0,01
2WSG 024	C	Floatglas, beschichtet	0,0040	10,00	11,01	12,04	0,23
3WSG 028	A	Floatglas, beschichtet	0,0040	10,00	11,01	12,04	0,23
3WSG 028	B	Stahlblech, verzinkt (0,25%)	0,0080	0,15	0,36	0,91	0,01
3WSG 028	C	Floatglas, beschichtet	0,0040	10,00	11,01	12,04	0,23
3WSG 028	D	Stahlblech, verzinkt (0,25%)	0,0080	0,15	0,36	0,91	0,01
3WSG 028	E	Floatglas, beschichtet	0,0040	10,00	11,01	12,04	0,23
	B	PU-Hartschaum	-	0,050	0,23	0,28	0,01
	D	PU-Hartschaum	-	0,050	0,23	0,28	0,01
ZUSAMMENFASSUNG		U <sub>neu</sub>	d	Masse	CO <sub>2</sub> -Äquivalent	KEA <sub>ne</sub>	KEA <sub>e</sub>
		[W/(m²K)]	[m]	[kg/m²]	[kgCO <sub>2</sub> /m²]	[kWh/m²]	[kWh/m²]
	1VGL 006	5,80	0,01	15,00	15,99	17,03	0,25
	3ISG 028	2,00	0,03	30,40	33,18	36,45	0,52
	2WSG 024	1,00	0,02	20,35	22,98	26,18	0,47
	3WSG 028	0,50	0,03	30,40	34,22	38,49	0,71



## Anhang D: Technische Daten von Heizungsverteilungssystemen

### Technische Daten von Heizkörpern (HK) und Fußbodenheizung (FBH)

<i>Angaben</i>	<i>Heizkörper (HK)</i>	<i>Fußbodenheizung (FBH)</i>
Hersteller / Typ	Horizontale Heizwand Zehnder nova / „NHLLHL56/07“	Nach [Pistohl2005]
Abmessungen	Bauhöhe: 567 mm Lamellenhöhe: 70 mm	Verlegeabstand: 100 mm PE-Rohre: 10 m/m <sup>2</sup> Durchmesse: 14,3 mm Wandstärke: 2,2 mm
Wärmeleistung	1.266 W/m	84 W/m <sup>2</sup> bei 27 °C Fußboden- Oberflächentemperatur
Stoffaufwand	Stahl: 34,75 kg/kW	Granulat: 4,35 kg/kW

### CO<sub>2</sub>-Äquivalent und KEA der Herstellung von HK und FBH

<i>Heizfläche</i>	<i>Stoffaufwand [kg/kW]</i>		<i>CO<sub>2</sub>-Äquivalent [kgCO<sub>2</sub>/kW]</i>	<i>KEA [kWh/kW]</i>	<i>KEA<sub>ne</sub> [%]</i>	<i>KEA<sub>e</sub> [%]</i>
HK	Stahl	34,75	51,05	139,01	99,7	0,3
FBH	Granulat	4,35	8,32	-0,38	114,1	-14,1

## Anhang E: Technische Daten von Anlagen zur Energiebereitstellung

### Technische Daten von BHKW-Anlagen nach [Sener Tec2006]

<i>Brennstoff/ Anlagentechnik</i>	<i>El. Leistung</i>	<i>Th. Leistung</i>	<i>Leistungsaufnahme</i>	<i>Elektrischer Wirkungsgrad</i>	<i>Thermischer Wirkungsgrad</i>	<i>Brennstoffnutzung</i>	<i>Auslastung</i>	<i>Lebensdauer</i>	<i>Strom - Bonus</i>	<i>Wärme - Bonus</i>
	[kW]	[kW]	[kW]	[%]	[%]	[%]	[h/a]	[a]	[kWh/kWh]	[kWh/kWh]
Öl-BHKW-th	5,3	10,5	17,9	30	59	89	5000	20	0,50476	-
Gas-BHKW-th	5,0	12,3	19,6	26	63	89	5000	20	0,40650	-
Öl-BHKW-Öl	5,3	10,5	17,9	30	59	89	5000	20	-	1,98113
Gas-BHKW-Gas	5,0	12,3	19,6	26	63	89	5000	20	-	2,46000

### Technische Daten von Windenergie- (WEA) und Photovoltaikanlagen (PVA)

<i>Anlage</i>	<i>Gemis Proezss</i>	<i>Leistung</i>	<i>Nutzungsgrad</i>	<i>Auslastung</i>	<i>Lebensdauer</i>
<i>Szenario</i>	<i>Energie: Strom-DE-WEA-PV-oSA</i>	[kW]	[%]	[h/a]	[a]
WEA klein	Wind-KW-Park-klein-DE-oSA	1.000	100	2000	20
WEA mittel	Wind-KW-Park-mittel-DE-oSA	5.000	100	2000	20
WEA groß	Wind-KW-Park-gross-DE-oSA	10.000	100	2000	20
PVA amorph	Solar-PV-amorph-Rahmen+Rack-DE-oSA	0,05	100	990	30
PVA mono	Solar-PV-mono-Rahmen+Rack-DE-oSA	0,05	100	990	30
PVA poly	Solar-PV-multi-Rahmen+Rack-DE-oSA	0,05	100	990	30



## Anhang F: Material-, Montage- und Investitionskosten von baulichen Maßnahmen

s. [Böhning2005], [Neddermann2005], [Baukosten2000], [BaukostenAtlas2005]

### Montagekosten relevanter Sanierungsprodukte

<b><i>Außenwand</i></b>	Dämmung	35	[€/m <sup>2</sup> ]
	Innenputz	5	[€/m <sup>2</sup> ]
	Außenputz	5	[€/m <sup>2</sup> ]
	Holzverkleidung	60	[€/m <sup>2</sup> ]
	Wärmedämmverbundsystem WDVS	60	[€/m <sup>2</sup> ]
	Wärmedämmputz	20	[€/m <sup>2</sup> ]
<b><i>Dach</i></b>	Dämmung Dachschräge zwischen	25	[€/m <sup>2</sup> ]
	Dämmung Dachschräge	20	[€/m <sup>2</sup> ]
	Sparren, Lattung setzen	30	[€/m <sup>2</sup> ]
	Lattung setzen, Gipskartonplatte	5	[€/m <sup>2</sup> ]
	Aufsparrendämmung	100	[€/m <sup>2</sup> ]
	Dämmung Flachdach	15	[€/m <sup>2</sup> ]
	Bitumenschicht und Filterschicht	10	[€/m <sup>2</sup> ]
<b><i>Kellerboden</i></b>	Estrich verlegen	10	[€/m <sup>2</sup> ]
	Dämmung verlegen	15	[€/m <sup>2</sup> ]
<b><i>Decken</i></b>	Kellerdecke dämmen	20	[€/m <sup>2</sup> ]
	Kellerdecke verputzen	5	[€/m <sup>2</sup> ]
	Zwischendämmung einsetzen	20	[€/m <sup>2</sup> ]
	Spanplatte anbringen	3	[€/m <sup>2</sup> ]
	Zwischen- und Unterdämmung	23	[€/m <sup>2</sup> ]
	Lattung setzen, Gipskartonplatte	5	[€/m <sup>2</sup> ]
<b><i>Fenster</i></b>	Ausbau, Entsorgung des alten Fensters	50	[€/m <sup>2</sup> ]
	Einbau, Abdichten des neuen Fensters	120	[€/m <sup>2</sup> ]

### Materialkosten relevanter Sanierungsprodukte

<b>Dämmstoffe</b>	Glaswolle Wärmeleitgruppe (WLG) 040	35	[€/m³]
	Steinwolle WLG 040	45	[€/m³]
	Hanf WLG 040	75	[€/m³]
	EPS WLG 040	65	[€/m³]
	PUR Hartschaum WLG 040	50	[€/m³]
	Schaumglas WLG 040	55	[€/m³]
	Schilfrohrplatte WLG 045	70	[€/m³]
	Holzwolle-Leichtbauplatten	60	[€/m³]
	Glaswolle TSD WLG 035	35	[€/m³]
	Steinwolle TSD WLG 036	45	[€/m³]
	EPS TSD WLG 044	65	[€/m³]
	Zelluloseplatten WLG 040	70	[€/m³]
<b>Wärmedämmputz</b>	Wärmedämmputz	2000	[€/m³]
<b>Außenwand</b>	Holzverkleidung	15	[€/m²]
	Lattung / Gipskartonplatte	5	[€/m²]
	WDVS – Material	5	[€/m²]
	Innenputz	5	[€/m²]
<b>Dach</b>	Lattung / Gipskartonplatte	5	[€/m²]
	Spannplatte	3	[€/m²]
	Sparren	7	[€/m²]
	Lattung, Konterlattung und Holzverschalung bei Aufsparrensanierung	7	[€/m²]
	Bitumenschicht und Filterschicht	7	[€/m²]
<b>Kellerboden</b>	Estrich	10	[€/m²]
<b>Decken</b>	Innenputz	5	[€/m²]
	Lattung / Gipskartonplatte	5	[€/m²]
<b>Fenster</b>	Holz 2-fach Wärmeschutzverglasung (WSG)	270	[€/m²]
	Holz 3-fach Isoverglasung (ISG)	200	[€/m²]
	Holz 3-fach WSG	330	[€/m²]
	Kunststoff 2-fach WSG	189	[€/m²]
	Kunststoff 2-fach ISG	140	[€/m²]
	Kunststoff 3-fach WSG	231	[€/m²]
	Aluminium 2-fach WSG	378	[€/m²]
	Aluminium 2-fach ISG	280	[€/m²]
	Aluminium 3-fach WSG	462	[€/m²]

### Investitionskosten bei Modernisierung der Fenster in €/m<sup>2</sup>

<i>Verglasungsart/-Güte</i>	<i>2-fach WSG</i>	<i>3-fach ISG</i>	<i>3-fach WSG</i>
Ausbau / Entsorgung des alten Fensters	50	50	50
Einbau und Abdichten der neuen Fensters	120	120	120
Fenster mit Kunststoffrahmen	189	140	231
Fenster mit Holzrahmen	270	200	330
Fenster mit Alurahmen	378	280	462
Investitionskosten Kunststoff	359	310	401
Investitionskosten Holz	440	370	500
Investitionskosten Alu	548	450	632

### Investitionskosten bei Sanierung der Obergeschoßdecken in €/m<sup>2</sup>

<i>Dämmstärke</i>	<i>8 cm</i>	<i>10 cm</i>	<i>12 cm</i>	<i>14 cm</i>
Dämmung anbringen	20	20	20	20
Decke verputzen	5	5	5	5
Deckenputz	10	10	10	10
Glaswolle	2,8	3,50	4,20	4,90
Steinwolle	3,60	4,50	5,40	6,30
Holzwohle-Leichtbauplatte	4,80	6,00	7,20	8,40
Investitionskosten Glaswolle	37,80	38,50	39,20	39,90
Investitionskosten Steinwolle	38,60	39,50	40,40	41,30
Investitionskosten Holzwohle-Leichtbauplatte	39,80	41,40	42,20	43,40

### Investitionskosten bei Sanierung der Außenwand in €/m<sup>2</sup>

<i>Dämmstärke</i>	<i>8 cm</i>	<i>10 cm</i>	<i>12 cm</i>	<i>14 cm</i>
WDVS anbringen	60	60	60	60
WDVS mit Steinwolle	3,60	4,50	5,40	6,30
WDVS mit Hanf	6	7,50	9	10,50
WDVS mit EPS	5,20	6,50	7,80	9,10
Investitionskosten bei Steinwolle	63,60	64,50	65,40	66,30
Investitionskosten bei Hanf	66,00	67,50	69,00	70,50
Investitionskosten bei EPS	65,20	66,50	67,80	69,10

### Investitionskosten bei Sanierung des Spitzdaches in €/m<sup>2</sup>

<i>Dicke der Unterdämmung</i>	<i>8 cm</i>	<i>10 cm</i>	<i>12 cm</i>	<i>14 cm</i>
<i>Dicke der Zwischendämmung</i>	<i>15 cm</i>	<i>15 cm</i>	<i>15 cm</i>	<i>15 cm</i>
Montage Zwischendämmung	20	20	20	20
Montage Unterdämmung	5	5	5	5
Montage Verkleidung	5	5	5	5
Lattung / Gipskartonplatte	5	5	5	5
Glaswolle WLG 040 Zwischendämmung	4,73	4,73	4,73	4,73
Glaswolle WLG 040 Unterdämmung	2,80	3,50	5,25	7,00
Schaumglas WLG 040 Zwischendämmung	33,75	33,75	33,75	33,75
Schaumglas WLG 040 Unterdämmung	20,00	25,00	37,50	50,00
Zellulose Hanf WLG 045 Zwischendämmung	13,50	13,50	13,50	13,50
Zellulose Hanf WLG 045 Unterdämmung	8,00	10,00	12,00	14,00
Investitionskosten bei Glaswolle	42,53	43,23	44,98	46,73
Investitionskosten bei Schaumglas	88,75	93,75	106,25	118,75
Investitionskosten bei Zellulose	56,50	58,50	60,50	62,50

### Investitionskosten bei Sanierung der Kellerdecke in €/m<sup>2</sup>

<i>Dämmstärke</i>	<i>8 cm</i>	<i>10 cm</i>	<i>12 cm</i>	<i>14 cm</i>
Dämmung anbringen	20	20	20	20
Decke verputzen	5	5	5	5
Deckenputz	5	5	5	5
Glaswolle WLG 040	2,80	3,50	4,20	4,90
Steinwolle WLG 040	3,60	4,50	5,40	6,30
Holzwohle-Leichtbauplatten WLG 90	4,80	6,00	7,20	8,40
Investitionskosten Steinwolle	32,80	33,50	34,20	34,90
Investitionskosten Hanf	33,60	34,50	35,40	36,30
Investitionskosten EPS	34,80	36,00	37,20	38,40

## Anhang G: Investitionskosten von apparativen Maßnahmen

s. [Böhning2005], [Neddermann2005], [Baukosten2000], [BaukostenAtlas2005]

### Preise von Heizungsanlagen und sonstige Kosten in €

<i>Jährlicher Bedarf in kWh/a</i>	<i>15.000</i>	<i>30.000</i>	<i>60.000</i>	<i>100.000</i>	<i>150.000</i>
Elektro Hzg	6000	10000	15000	22000	28000
Öl Hzg NT	5000	6000	10000	16500	25500
Öl Hzg BW	6000	7500	13000	21000	30500
Erdgas Hzg NT	6000	7000	11000	18000	28000
Erdgas Hzg BW	7000	8500	14000	22500	33500
Flüssiggas Hzg NT	5500	6500	10500	17500	26500
Flüssiggas Hzg BW	6500	7000	11500	18500	28700
Holzpellets Hzg	9700	14000	23000	35000	46000
BHKW	15000	20500	30000	35500	45000
Windkraft	12000	24000	48000	80000	120000
Photovoltaik	85500	168000	330000	540000	795000
Erdwärmepumpe	12000	13300	22500	30000	40000
Elektroinstalation	1200	2000	3000	4400	5600
Heizkörper	6000	9000	12000	17500	25000
Fußbodenheizung	8000	12000	15000	20000	28500
Tankraum	2000	2000	2500	3000	4000
Tank	1500	2000	3000	4500	6000
Steuerung	1600	1600	2500	3000	4000
Anschlußkosten Gas/Wasser	500	500	500	500	500
Heizungs-/Lagerraum	1500	1500	2000	2500	3000
Erschließung Wärmequelle	6000	13500	20500	28500	35000

## Lebenslauf

Name: Lamia Messari-Becker (geb. Messari)  
Titel: Dipl.-Ing. (TU)  
Geburtsdatum: 12.03.1973  
Geburtsort: Larache, Marokko

Schul Ausbildung

Abitur: Lycée La Marche Verte in Kénitra/Marokko  
Baccalauréat de l'Enseignement Secondaire, Session Juni'90,  
Académie de Kénitra

Einreise in BRD: März 1992

Studienkolleg: Johannes Gutenberg Universität in Mainz  
von 01.07.92 bis 15.12.93

Studium Bauingenieurwesen WS 1994/95 bis WS 2000/01  
an der Technischen Universität Darmstadt

Vordiplom: 31.03.1996  
Bilfinger + Berger AG Förderpreis 1998

Diplom: April 2001

Seit Juli 2001: Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Massivbau  
der Technischen Universität Darmstadt